VIDA EN LOS FONDOS ANTARTICOS • IMPULSOS ULTRACORTOS DE LASER • VACUNAS COMESTIBLES



NOVIEMBRE 2000
800 PTA. 4,81 EURO

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

GENES Y RENDIMIENTO ATLETICO



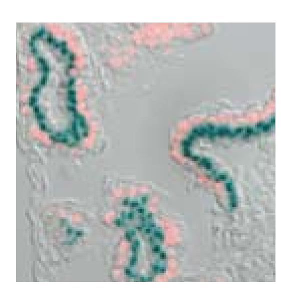


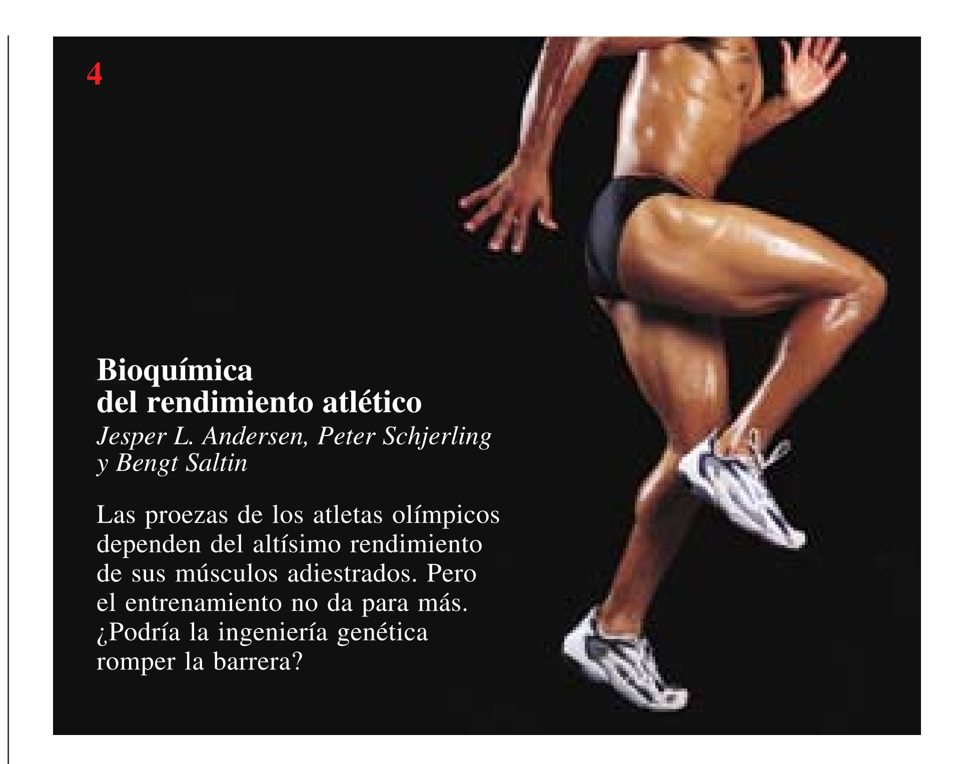
Noviembre de 2000 Número 290

SECCIONES







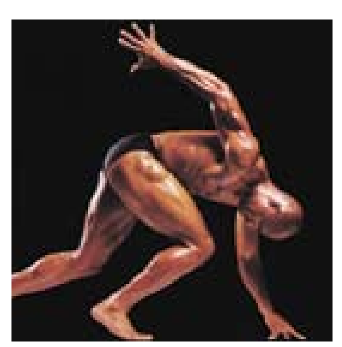






Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

SECCIONES



Portada: Howard Schatz
Schatz/Ornstein Studio

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
4	Howard Schatz
5	Jennifer Johansen
6-7	Keith Kasnot
8	Jennifer Johansen
10	Howard Schatz
12	Laura Dwight (*fotografía*); cortesía de Jesper L. Andersen (*fibra muscular*)
14-15	Mark A. Garlick
16	Alfred T. Kamajian
17	Alfred T. Kamajian (*izquierda*); Jennifer Johansen (*derecha*)
19	Jennifer Johansen (*recuadro*); fuente: cfa-www.harvard.edu/planets/catalog.html; Alfred T. Kamajian (*ilustraciones*)
20-21	Jennifer Johansen
25	Robert P. Ruschak
26-27	Robert P. Ruschak (*arriba y abajo izquierda*); cortesía de Western Pennsylvania Conservancy (*abajo derecha*)
28-29	Barry Ross
30-31	Robert P. Ruschak, cortesía de Western Pennsylvania Conservancy (*fotografías*); Barry Ross (*dibujo*)
46-47	Diana Clarke, Medizin-Nobelinstitut, Stockholm
48	Slim Films
50	Laurie Grace (*arriba y abajo izquierda*); Gérard A. Mourou (*micrografía*)
51	Herbert Welling (*arriba*); Laurie Grace (*abajo*)
52-53	Laurie Grace
54-55	Laurie Grace (*ilustraciones*); John-Mark Hopkins (*fotografía*)
57	Johnson & Fancher
58	Forest McMullin
59-60	Jared Schneidman Design
61	Cortesía de Peter Beyer
62	Jared Schneidman Design
64-65	J. Gutt, cortesía del Instituto Alfred Wegener de Investigación Polar y Marina
66-74	Jordi Corbella (*dibujos*); originales de: *2*, V. Smetacek y autores; *3*, S. H. Kang y A. Clarke; *4*, autores; *5*, R. Scharek y autores; *6*, autores; *7*, R. Rield y autores; *8*, J. Gutt; *recuadro* e ilustr. *9* y *10*, autores
76-77	Pamela Patrick (*ilustración*), cortesía de Tom Dillehay (*fotografía*)
78-79	Susan Carlson (*mapa*); Kenneth Garrett (*punta de flecha y cuero*); cortesía de Tom Dillehay (*huella*); cortesía de James Adovasio (*cesto*); Daryl P. Miller (*rascador*); ©BBC (*reconstrucción facial*)
80	Jennifer Johansen
81	Kenneth Garrett
82	Kenneth Garrett (*izquierda*); cortesía de Tom Dillehay (*derecha*)
83	Pamela Patrick

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Juan Carlos Rodríguez Rubio: *Bioquímica del rendimiento atlético*; M.ª Rosa Zapatero Osorio: *Sombras de otras Tierras*; Juan Pedro Campos: *Láser de pulsos ultracortos*; Esteban Santiago: *Vacunas comestibles*; Germán Delibes de Castro: *Los primeros americanos*; José M.ª Valderas Martínez: *De cerca* y *Nexos*; Luis Bou: *Juegos matemáticos*; Angel Garcimartín: *Perfiles*; J. Vilardell: *Hace..., Taller y laboratorio* e *Ideas aplicadas*

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (España)
Teléfono 93 414 33 44 Telefax 93 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
MANAGING EDITOR Michelle Press
ASSISTANT MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Philip M. Yam
SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix
ON-LINE EDITOR Kristin Leutwyler
SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs
EDITORS Mark Alpert, Carol Ezzell, Steve Mirsky, Madhusree Mukerjee, George Musser, Sasha Nemecek, Sarah Simpson y Glenn Zorpette
PRODUCTION William Sherman
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Charles McCullagh
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Gretchen G. Teichgraeber
CHAIRMAN Rolf Grisebach

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 93 414 33 44
Fax 93 414 54 13

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	8.800 pta.	16.000 pta.
	52,89 euro	96,16 euro
Extranjero	11.500 pta.	21.500 pta.
	69,12 euro	129,22 euro

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 800 pta. 4,81 euro
Extraordinario: 1.000 pta. 6,01 euro

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Aragoneses, 18 (Pol. Ind. Alcobendas)
28108 Alcobendas (Madrid)
Tel. 91 484 39 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono 93 414 33 44

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, semisótano, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. 91 409 70 45 – Fax 91 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. 93 321 21 14
Fax 93 414 54 13



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Filmación y fotocromos reproducidos por Dos Digital, Zamora, 46-48, 6ª planta, 3ª puerta - 08005 Barcelona
Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

HACE...

...cincuenta años

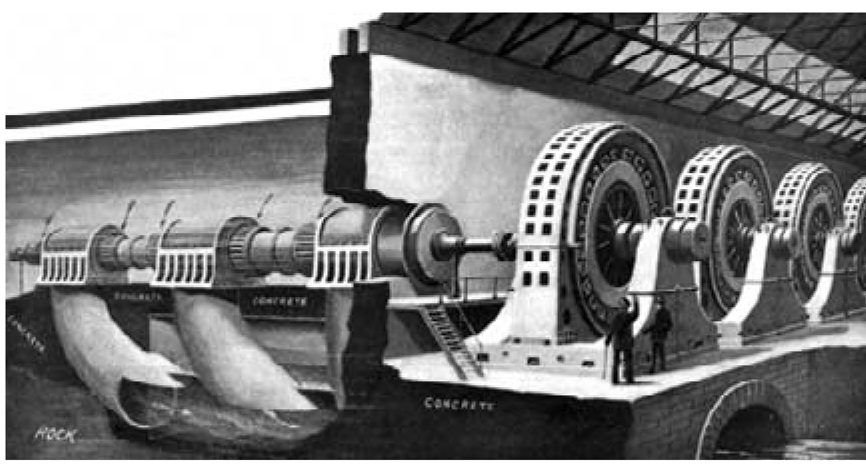
SORPRESA GENÉTICA. «Hace treinta años era creencia general que la vieja cuestión del modo en que los seres vivos transmiten su herencia biológica a sus descendientes estaba resuelta. La herencia podía rastrearse hasta unos factores invisibles, llamados genes, alojados en el núcleo. En el marco de esa explicación, el citoplasma (la sustancia celular que rodea al núcleo) era sólo un socio mudo. Hoy, se proclama que el citoplasma, al igual que el núcleo, alberga elementos similares a los genes que intervienen en la conformación de la herencia de los organismos. Algunos biólogos han llegado incluso a sostener que el citoplasma controla todas las características básicas del organismo y que los genes nucleares sólo determinan las de segundo rango. Los genéticos rechazan, en su mayoría, tan extremo parecer.»

REFUGIO CONTRA LA LLUVIA RADIACTIVA. «Se ha presentado un 'plan director' para la defensa de la nación norteamericana, preparado por la Agencia de Movilización Civil del Comité de Recursos para la Seguridad Nacional y sometido al Congreso por el presidente Truman. El plan descarga la 'responsabilidad principal' en los estados y municipios bajo la filosofía de la 'autoprotección organizada'. En la ciudad de Nueva York el hotel Sherry-Netherland ha tomado medidas para proteger a sus huéspedes en sus profundos sótanos, y un rascacielos que se proyecta construir en la avenida Madison incluye en sus planos un refugio de 4000 plazas.»

...cien años

EL CENSO DE 1900. «Según el anuncio oficial del director, señor Merriman, del XII Censo de los Estados Unidos, sus 45 estados y siete territorios tienen una población de 76.295.220 almas, frente a 63.069756 en 1890; o sea, gana 13.225.464 en diez años, un 21 por ciento. Las tres ciudades más populosas son la Gran Nueva York (incluida la barriada de Brooklyn), 3.437.202; Chicago, 1.698.575, y Philadelphia, 1.293.697.»

ALFARERÍA DE ROOKWOOD. «Los premios de cerámica de la Exposición de París han servido para despertar un nuevo interés en una singular institución de Cincinnati (Ohio). La alfarera de Rookwood no sólo ha producido la loza más artística jamás manufacturada a este lado del Atlántico, sino que además podría representar perfectamente las ideas y métodos americanos acerca del trabajo alfarero. Salvo el primitivo torno de alfarero, en las labores de manufactura de la planta de Rookwood no se emplean máquinas. Desde la mezcla de la arcilla hasta la extracción del horno de la pieza de loza acabada, cada ejemplar de Rookwood pasa por las manos de veintiún operarios.»



Turbinas de la central eléctrica de Massena, Nueva York, 1900

UNA MARAVILLA HIDROELÉCTRICA. «A punto de terminarse, en Massena (Nueva York), en la ribera del San Lorenzo, se alza una de las centrales hidroeléctricas más modernas y gigantes, auténtico hito del siglo que termina. Los rápidos de Long Sault del San Lorenzo están en una cota de casi trece metros más alta que su afluente el Grasse. Aprovechando esa circunstancia se ha abierto un canal en el terreno que media entre ambos. Ahora, en los bancos del Grasse se encuentra una central eléctrica que hace de conducto de descarga de las aguas efluentes. Su actual rendimiento es de 75.000 caballos (*ilustración*).»

...ciento cincuenta años

BOCIO Y CRETINISMO. «El doctor Grange, sabio médico parisiense, fue encargado hace algún tiempo por el gobierno de la realización, en Francia y otros países, de investigaciones acerca de las causas del *bocio* y el *cretinismo*. Según sus rotundas conclusiones, ambos males son independientes de la latitud, la altitud y el clima, e incluso de las circunstancias de hábitat, pobreza y otras. Su presencia parece estar relacionada con el contenido en magnesia de bebidas y alimentos; su ausencia es muchas veces consecuencia del yodo incluido en los mismos.»

¿CORREO ENTRE CARACOLES? «Nosotros no habríamos reparado en esta cuestión, sólo la hemos visto reproducida en varios diarios. '¡Aniquiladas las maravillas del telégrafo eléctrico, se acaba de descubrir por qué medios se efectúa la comunicación instantánea entre un hombre y otro, cualquiera que sea la distancia! Los inventores de la presunta maravilla han comprobado que ciertos tipos de caracoles poseen unas raras propiedades de simpatía. Con los caracoles dentro de cajas, el operador sólo tiene que hacer que el caracol A dé una sacudida (*sic*) para que el caracol B en su caja correspondiente, que podría estar en las selvas interiores de América del Norte o en los desiertos de Africa, reproduzca la sacudida. Desde luego los caracoles deben ponerse en comunicación simpática.' Un disparate francés.»

Bioquímica
del rendimiento atlético

La biología celular del músculo ayuda a entender el rendimiento de los atletas e indica el camino a seguir para mejorar sus posibilidades

Jesper L. Andersen, Peter Schjerling y Bengt Saltin



"¡Preparados!" Un silencio absoluto reina en el estadio mientras 60.000 pares de ojos se clavan en ocho de los hombres más ligeros del planeta. Nos encontramos en Sevilla. Es el 22 de agosto de 1999 y se celebra la final de 100 metros de los campeonatos mundiales de atletismo.

El pistoletazo de salida resuena en el aire cálido del atardecer. Ruge la muchedumbre cuando los deportistas corren por sus calles. Tan sólo 9,80 segundos después el ganador cruza la meta. Ese día lo fue Maurice Greene, un atleta de 25 años de Los Angeles.

¿Por qué es Maurice Greene, y no Bruny Surin de Canadá, que acabó segundo, el hombre más veloz del planeta? Después de todo, ambos han entrenado sin descanso durante años, manteniendo un régimen ascético basado en ejercicio, reposo, una dieta estricta y poco más. La respuesta, compleja, comporta un sinnúmero de pequeños detalles, como la actitud mental de los atletas el día de la competición o incluso el diseño de sus zapatillas deportivas. Pero en las carreras cortas, al depender de la potencia, el factor fisiológico resulta determinante: las fibras musculares de las piernas de Greene, en particular sus muslos, desarrollan, en el breve intervalo de la carrera, una potencia ligeramente mayor que la de sus contrincantes.

Los hallazgos recientes de diversos laboratorios, incluido el nuestro, han ampliado el conocimiento sobre la adaptación del músculo al ejercicio, o a la falta del mismo, y sobre el grado de alteración que puede sufrir para acometer pruebas diversas, como el esfuerzo prolongado del maratón o el ímpetu de los 100 metros. Esta información nos ayuda a comprender por qué triunfó Greene y a conocer mejor las posibilidades del común de la gente. También arroja luz sobre la cuestión permanente de si los corredores, los nadadores, los ciclistas y los esquiadores de elite nacen diferentes del resto de los mortales o si el tesón y el entrenamiento convierten a cualquiera en un campeón.

El músculo, el tejido más abundante del cuerpo humano, destaca por su versátil adaptación. Un entrenamiento intenso con pesas puede duplicar o triplicar el tamaño del músculo; por contra, la falta de ejercicio —durante un viaje espacial, por ejemplo— puede encogerlo un 20 por ciento en dos semanas. Los fenómenos bioquímicos y biomecánicos subyacentes bajo esa plasticidad son sumamente complejos, pero decenios de investigación nos han permitido elaborar una imagen bastante completa de la respuesta muscular al entrenamiento atlético.

Un músculo es un haz de células, fibras que se mantienen juntas merced al tejido conjuntivo. Cada fibra de músculo esquelético consta de una membrana, muchos núcleos dispersos donde se alojan los genes e instalados justo bajo la membrana a lo largo de la fibra, y miles de haces internos, denominados miofibrillas, que constituyen el citoplasma celular. Las fibras musculares mayores y más largas miden 30 centímetros de longitud y de 0,05 a 0,15 milímetros de anchura; contienen varios millares de núcleos.

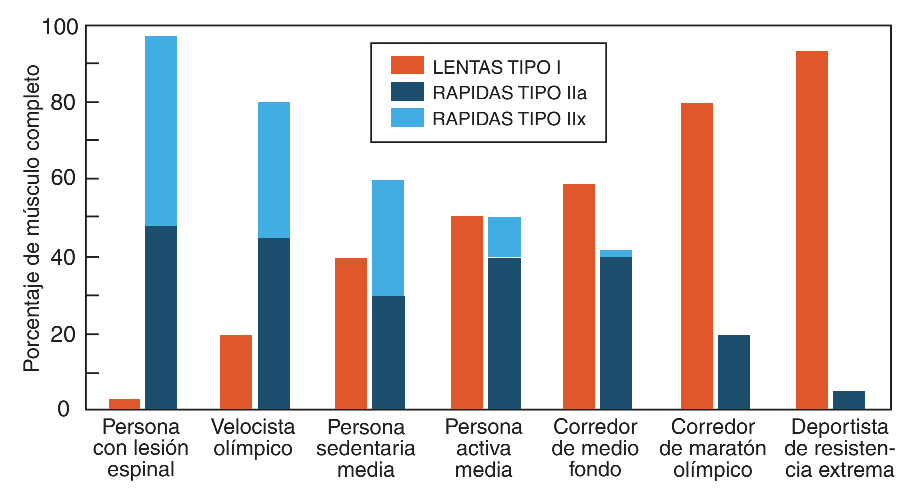
Las miofibrillas llenan el interior de la fibra muscular, tienen la misma longitud que ésta y son la parte responsable de la contracción de la célula en respuesta a los impulsos nerviosos. Las células neuromotoras se extienden desde la médula espinal hasta un grupo de fibras, integrando una unidad motora. En los músculos de las piernas, una neurona motora controla, "inerva", de cientos a mil fibras musculares. Por contra, cuando se requiere una precisión finísima, como en el control de un dedo, el globo ocular o la laringe, una neurona motora controla sólo una o, a lo más, unas cuantas fibras musculares.

La contracción propiamente dicha de la miofibrilla se logra merced a unas microunidades, los sarcómeros; éstos se unen entre sí por sus extremos para constituir una miofibrilla. En el interior del sarcómero distinguimos la miosina y la actina, dos proteínas filamentosas cuya interacción provoca la contracción. Durante la contracción un sarcómero se acorta como un telescopio retráctil: los filamentos de actina, situados en los extremos de un filamento de miosina, se deslizan hacia el centro de ésta.

Posee la molécula de miosina un componente, conocido por cadena pesada, que determina las características funcionales de la fibra muscular. En un adulto, existen tres isoformas o variedades de cadenas pesadas. Son la I, IIa y IIx, apelativos que reciben asimismo las fibras que las contienen. A las fibras del tipo I se las conoce también por fibras lentas; a los tipos IIa y IIx, por fibras rápidas. Hay en ello una razón de peso. La máxima velocidad de contracción de una fibra del tipo I es unas diez veces menor que la de una fibra del tipo IIx. La velocidad de las fibras del tipo IIa se encuentra a medio camino entre las dos anteriores.

La materia muscular

Las velocidades de contracción de las fibras difieren en atención a la forma en que éstas descomponen la molécula de adenosín trifosfato en la región de la cadena pesada para obtener la energía necesaria en la contracción. Las fibras lentas desarrollan un metabolismo aeróbico, bas-



1. LAS PIERNAS DE BRIAN LEWIS, corredor de los 100 metros (*página anterior*), albergan una proporción de fibras musculares rápidas mayor que las de un corredor de fondo u otro atleta que fíe en la resistencia. La celeridad de contracción de las fibras rápidas IIx decuplica la de las fibras lentas del tipo I; entre ambas se sitúa la velocidad de contracción de las fibras del tipo IIa.

JESPER L. ANDERSEN, PETER SCHJERLING y BENGT SALTIN trabajan en el centro de investigación muscular adscrito a la Universidad de Copenhague. Andersen, que entrenó al equipo de atletismo de la selección nacional danesa, investiga en el departamento de biología molecular del músculo. Schjerling pasó de la genética de levaduras a la humana. Saltin, director del centro, participó en su juventud en competiciones atléticas.

tante eficiente; mientras que las fibras rápidas dependen más del metabolismo anaeróbico. Así, las fibras lentas cumplen un papel excelente en ejercicios de resistencia, carreras largas, ciclismo y natación; las fibras rápidas son esenciales para suministrar potencia (caso de la halterofilia y las carreras cortas).

Si nos fijamos por ejemplo en el músculo cuádriceps del muslo de un adulto sano observaremos un número aproximadamente igual de fibras lentas y rápidas. Pero las variaciones interindividuales son notables. Nosotros hemos observado personas con un porcentaje de fibras lentas en el cuádriceps de sólo un 19 por ciento y otras de hasta un 95 por ciento. El sujeto con un 95 por ciento de las fibras lentas podría, a buen seguro, llegar a ser un maratoniano consumado, pero no tendría nada que hacer en las carreras cortas; lo opuesto sería cierto para una persona con un 19 por ciento de las fibras lentas.

Amén de los tres tipos de fibras enumerados, existen híbridos que portan dos isoformas de miosina. Las fibras híbridas siguen una escala continua que va de las que están casi totalmente compuestas por la isoforma lenta a fibras donde predomina casi por entero la rápida. En cualquier caso, las características funcionales de la fibra se asemejan a las del tipo de isoforma dominante.

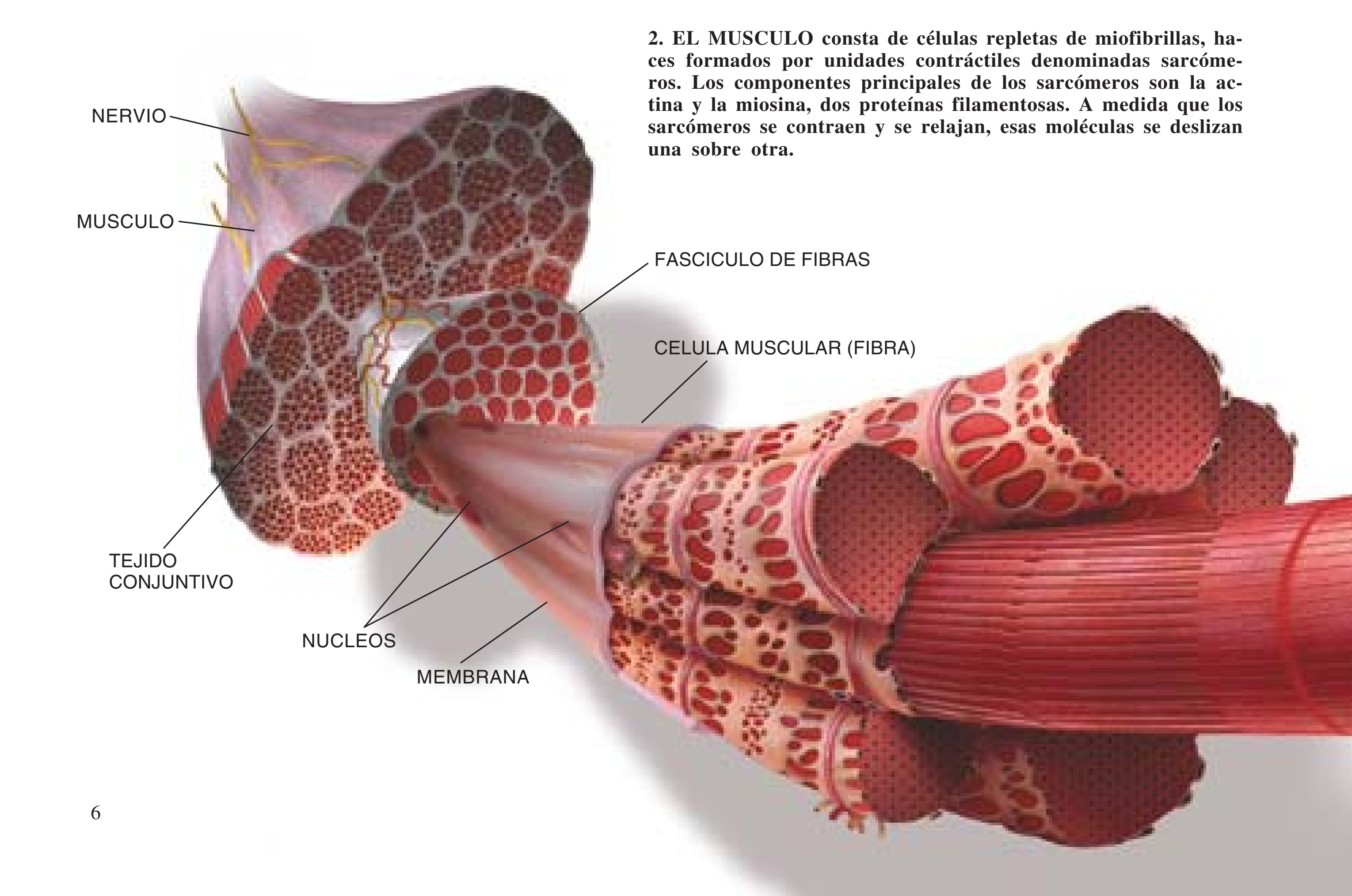
La miosina es una proteína insólita. Llama la atención que, tras la comparación entre las isoformas de distintos mamíferos, se hallara que hubiera poca variación de una especie a otra. La miosina lenta (tipo I) en ratas es mucho más parecida a la isoforma lenta en humanos que a la propia miosina rápida en ratas. Se refuerza así la idea de que la presión evolutiva ha mantenido a las isoformas de miosina funcionalmente distintas, presión que ha conservado isoformas particulares que surgieron hace millones de años. Incluso las criaturas más antiguas y primitivas contaban con isoformas de miosina no muy diferentes de las nuestras.

Espesor muscular

Las fibras musculares no pueden dividirse para formar otras nuevas. Con la edad se van perdiendo fibras musculares, que nunca se recuperarán. Por tanto, el músculo sólo aumentará de masa cuando sus fibras componentes adquieran mayor espesor.

Espesor que depende de la creación de miofibrillas adicionales. El estrés mecánico que produce el ejercicio sobre los tendones y otras estructuras conectadas al músculo pone en marcha proteínas de señal que activan los genes responsables de la síntesis muscular de más proteínas contráctiles. Estas proteínas, en su mayoría miosina y actina, se van necesitando a medida que la fibra va produciendo grandes cantidades de ulteriores miofibrillas.

Se requieren más núcleos para la síntesis y mantenimiento de más proteína y para conservar cierta proporción entre volumen celular y número de núcleos. Sabemos que las fibras musculares contienen múltiples núcleos, pero los del interior de las fibras no pueden dividirse; los nue-



2. EL MUSCULO consta de células repletas de miofibrillas, haces formados por unidades contráctiles denominadas sarcómeros. Los componentes principales de los sarcómeros son la actina y la miosina, dos proteínas filamentosas. A medida que los sarcómeros se contraen y se relajan, esas moléculas se deslizan una sobre otra.

vos núcleos provienen de células satélite (o células madre). Dispersas entre los múltiples núcleos en la superficie de la fibra de un músculo esquelético, las células satélite están separadas de las musculares. Las células satélite poseen un núcleo solo y pueden replicarse por división. Tras fusionarse con la fibra muscular, sirven de fuente de abastecimiento de nuevos núcleos para la fibra en crecimiento.

Las células satélite proliferan en respuesta al desgaste debido al ejercicio. Se supone que tamaña actividad provoca microfisuras en las fibras. El área dañada atrae a las células satélite, que se incorporan al tejido muscular y comienzan a producir proteínas para rellenar el espacio. A medida que se van multiplicando las células satélite, unas persisten en su estado y otras se incorporan en el tejido muscular. Los núcleos de éstas se tornan indistinguibles del resto de los núcleos de la célula. Con tales núcleos supernumerarios, la fibra sintetizará más proteínas y creará nuevas miofibrillas.

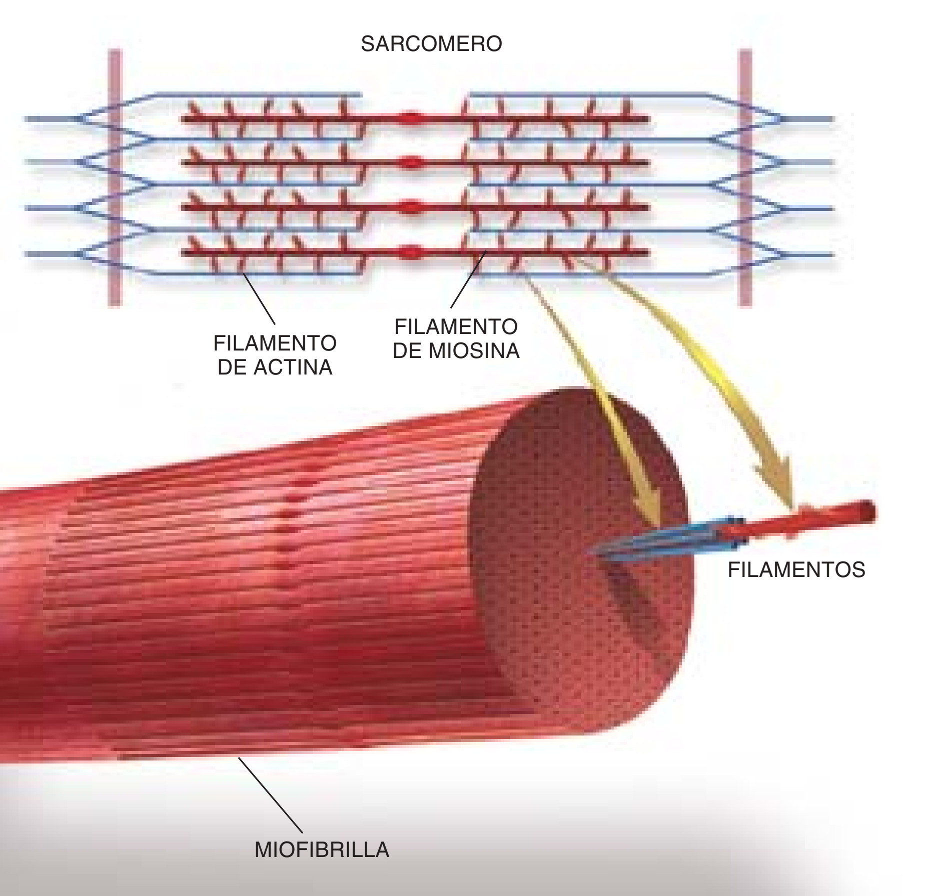
Para fabricar proteínas, las células ejecutan el programa cifrado en los genes, donde se indica el orden de engarce de los aminoácidos componentes; dicho de otro modo, especifica qué proteína se sintetizará. El proceso a través del cual la información pasa del núcleo celular al citoplasma, donde se producirá la proteína, comienza con la transcripción. Acontece ésta en el núcleo, cuando la información de un gen (codificada en ADN) se copia en una molécula de ARN mensajero. Luego, el ARNm porta esta información a los ribosomas, fuera del núcleo. Los ribosomas ensamblan aminoácidos en proteínas —en actina o en una de las isoformas de miosina— de acuerdo con las especificaciones del ARNm. A este último proceso se le llama traducción. Por "expresión" del gen se entiende el mecanismo entero de síntesis de la proteína a partir del gen en cuestión.

En el estudio del músculo esquelético importan dos aspectos fundamentales, que atañen directamente al rendimiento atlético. Uno se centra en la hipertrofia muscular causada por el ejercicio y demás estímulos; el otro contempla la conversión de las fibras musculares de un tipo en otro por obra de dicho ejercicio. En ambos frentes se han registrado notables avances, con la participación, entre otros, de los redactores de este artículo.

Hemos de remontarnos a comienzos de los años sesenta, cuando A. J. Buller y John Carew Eccles, de la Universidad Nacional Australiana en Canberra, y el equipo encabezado por Michael Bárány, del Instituto de Enfermedades Musculares en Nueva York, realizaron una serie de estudios en animales en los que convertían fibras musculares rápidas en fibras lentas, y a la inversa. Emplearon varios métodos, sobre todo el de inervación cruzada. Conmutaron un nervio que controlaba un músculo lento con otro asociado a un músculo rápido, de suerte que cada uno controlara el tipo de fibra opuesto. Provocaron también la estimulación eléctrica de los músculos durante períodos prolongados o, para obtener el efecto opuesto, cortaron el nervio motor.

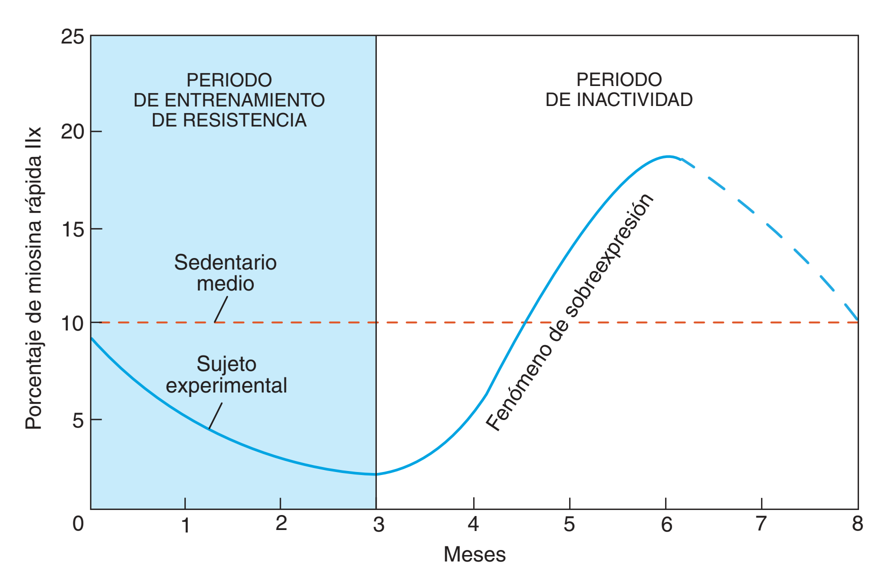
Durante los años setenta y ochenta, la investigación se propuso demostrar que la capacidad de una fibra para cambiar de tamaño y tipo se daba también en humanos. Un ejemplo, extremo, de este efecto de plasticidad muscular se produce en las personas que han sufrido una grave lesión de la médula espinal con la paraplejía consiguiente. La falta de impulsos nerviosos y la ausencia de actividad muscular provocan una merma extensa de tejido, acorde con lo esperado. Menos imaginado resulta el cambio espectacular que experimenta el tipo de fibra. Estos pacientes paralizados sufren una disminución aguda de la cantidad relativa de la isoforma lenta de miosina y un drástico incremento de la cantidad de isoformas rápidas de ésta.

Se ha demostrado que muchos de estos pacientes, después de cinco a diez años de parálisis, apenas tienen miosina lenta en el músculo vasto lateral, que es parte del cuádriceps del muslo; toda la miosina allí presente es del tipo rápido. Recuérdese que en un adulto sano la mitad de las fibras son lentas y la otra mitad rápidas. Nosotros propusimos que, para mantener la expresión de la isoforma lenta de la miosina, se requería la estimulación nerviosa del músculo mediante activación eléctrica. Así, la electroestimulación muscular o el ejercicio inducido eléctricamente podían reintroducir, hasta cierto punto, la miosina lenta en los músculos paralizados.



Conversión del músculo

La transformación de las fibras musculares no se limita al restablecimiento de músculos paralizados y otros casos extremos. Cuando los músculos sanos se someten a cargas pesadas de forma repetida, como en los programas de entrenamiento



3. CIERTOS RESULTADOS EXPERIMENTALES INESPERADOS tienen aplicaciones prácticas para el atleta. Tal como se esperaba, la concentración de miosina rápida IIx decayó durante el entrenamiento de resistencia. Pero cuando se abandonó el ejercicio, en vez de volver de nuevo a los niveles de partida, la cantidad relativa de IIx duplicó estos valores tras tres meses de inactividad. ¿Qué significado encierra ello para un velocista? Puesto que en su caso la miosina IIx es decisiva, deberá programar un período de entrenamiento moderado antes de una competición.

con pesas, el número de fibras rápidas IIx desciende y se convierten en fibras rápidas IIa. En estas fibras el núcleo deja de expresar el gen IIx y comienza a expresar el IIa. Tras un mes de entrenamiento, todas las fibras musculares IIx acabarán transformadas en fibras IIa. Al propio tiempo, las fibras aumentan su producción de proteínas y volumen.

A comienzos de los años noventa, Geoffrey Goldspink propuso que el gen IIx constituía una especie de normalización por defecto. Esta hipótesis se ha ratificado en estudios que han demostrado que las personas sedentarias tienen mayor nivel de miosina IIx en sus músculos que las activas y "en forma". Agréguese a ello la correlación positiva entre miosina IIa y actividad muscular que se ha descubierto en investigaciones complementarias.

¿Qué ocurre cuando se abandona el ejercicio? Las fibras IIa se reconvierten en IIx, aunque no en la forma esperada. Para elucidar los mecanismos de la transformación, se tomaron muestras musculares del músculo vasto lateral de nueve varones daneses jóvenes y sedentarios. Después, se sometieron a un entrenamiento fuerte de resistencia, centrado en el cuádriceps, durante tres meses; a cuyo término se realizó otra biopsia muscular. Transcurrido ese período, se cortó el entrenamiento de resistencia y volvieron a su vida sedentaria. A los tres meses de inactividad (de acuerdo con su proceder previo al entrenamiento) se les volvió a realizar una tercera y última biopsia.

Como era de esperar, la cantidad relativa de la isoforma IIx de miosina rápida en el músculo vasto lateral cayó de un 9 por ciento a un 2 por ciento, de media, en el período de entrenamiento. Se contaba con que durante el período de inactividad la cantidad relativa de la isoforma IIx volvería simplemente al nivel previo al entrenamiento, el 9 por ciento. Para nuestra sorpresa, la cantidad relativa de miosina IIx alcanzó un valor medio del 18 por ciento. No se continuaron las biopsias tras estos tres meses, pero sospechamos que la miosina IIx volvió a su valor inicial del 9 por ciento algunos meses después.

Desconocemos el motivo de este fenómeno de sobreexpresión de la isoforma IIx de la miosina rápida. Lo que no nos impide extraer algunas conclusiones prácticas. En concreto, si los corredores de distancias cortas quieren aumentar la cantidad relativa de las fibras más rápidas de sus músculos, lo mejor sería empezar por hacer desaparecer las fibras rápidas mediante un entrenamiento intenso, para moderar luego éste a la espera de que las fibras más rápidas se dupliquen. Así, sería aconsejable que programasen un período de entrenamiento moderado, o de disminución gradual, en vistas a una competición importante. De hecho, muchos velocistas ya aplican este régimen por propia experiencia, sin conocer la fisiología subyacente.

¿Lento a rápido?

La conversión de las fibras rápidas IIa en IIx (y a la inversa) es una consecuencia natural del entrenamiento y del cese del ejercicio. Pero, ¿a qué se debe la conversión de las fibras lentas de tipo I en fibras rápidas de tipo II? Los resultados a este respecto son más sombríos. Muchos experimentos realizados a lo largo de los últimos veinte años no aportaron pruebas de la conversión de fibras lentas en rápidas, o viceversa. Pero a comienzos de los años noventa nuestros resultados indicaban que un ejercicio intenso puede convertir fibras lentas en fibras rápidas IIa.

En un estudio de tres meses, centrado en velocistas de distancias cortas, se combinó el entrenamiento de resistencia intensa con carreras (ejercicios básicos en el ciclo anual de entrenamientos de un "sprinter"). Por su parte, el equipo encabezado por Mona Esbörnsson, del Instituto Karolinska, obtuvo datos similares en un estudio con doce personas que no eran atletas de elite. Estos resultados respaldan la tesis de que un programa de entrenamiento intenso con levantamiento de pesas, unido a otras formas de ejercicio anaeróbico, convierte no sólo las fibras IIx en IIa, sino también las fibras del tipo I en IIa.

Si una clase de ejercicio convierte fibras I en fibras IIa, ¿habrá otra que transforme IIa en I? No ha quedado demostrado. Lo cierto es que los atletas de competiciones de resistencia —carreras de fondo, natación, ciclismo y otras— tienen muchas fibras lentas del tipo I (hasta un 95 por ciento) en las principales masas musculares, las de las piernas por ejemplo. Se ignora si esos deportistas nacieron con tamaño porcentaje de fibras I y vencieron en las disciplinas en que aprovecharon esa característica congénita o si la proporción muscular de fibras del tipo I aumentó con el entrenamiento prolongado. Sabemos, no obstante, que, si las fibras rápidas del tipo IIa se transforman en lentas de tipo I, el tiempo re-



4. LOS SPRINTERS Y LOS CORREDORES DE MARATON manifiestan diferencias notables en la musculatura de sus piernas. Las fibras rápidas se apoyan en el metabolismo anaeróbico; las fibras lentas dependen del metabolismo aeróbico. Por eso, las fibras lentas importan en deportes de resistencia y las rápidas en la velocidad en distancias cortas y la halterofilia. El velocista es Brian Lewis; el maratoniano, Khalid Khannouchi.

querido para esta conversión es muy superior al que requiere la conversión de fibras IIx en IIa.

Quizá los deportistas maratonianos han nacido diferentes del resto de la gente. Pudiera ser también que los velocistas presentaran peculiaridades congénitas: éstos, en contraste con los corredores de distancias largas, se beneficiarían de un porcentaje pequeño de fibras del tipo I. Lo que no significa que un aspirante a velocista con demasiadas fibras del tipo I deba retirarse, pues el entrenamiento de resistencia hipertrofia las fibras del tipo II el doble que las fibras del tipo I. Así, el entrenamiento con pesas aumenta la superficie ocupada por las fibras rápidas sin modificar la proporción muscular entre fibras lentas y rápidas. Las características funcionales del músculo dependen de las superficies relativas ocupadas por las fibras lentas en la sección muscular. Cuanto mayor sea la superficie relativa ocupada por las fibras rápidas, tanto más veloz será el músculo. Por tanto, un “sprinter” puede modificar las características de sus músculos, si los ejercita intensamente, lo que aumenta la superficie relativa de fibras rápidas.

En 1988, el grupo encabezado por Michael Sjöström, de la Universidad de Umea en Suecia, demostró que, en cortes histológicos del músculo, las superficies medias de las secciones transversales de los tres tipos principales de fibras eran casi idénticas en los músculos vastos laterales de un grupo de corredores de maratón. En estos individuos la superficie media de las secciones de tipo I, IIa y IIx era, respectivamente, de 4800, 4500 y 4600 micrometros cuadrados. Por contra, para un grupo de velocistas de distancias cortas la superficie media de las secciones de estas fibras era, respectivamente, de 5000, 7300 y 5900 micrometros cuadrados. Nosotros hemos recogido resultados similares.

Las transformaciones difíciles de obtener por entrenamiento, así las de fibras IIa en fibras I, se lograrán muy pronto a través de la manipulación genética. Se estudia la expresión de los genes de miosina presentes en el genoma humano, que, sin embargo, no se expresan naturalmente. Esos genes son vestigios archivados de ciertos tipos de miosina que debieron dotar, a nuestros antepasados mamíferos, de un tejido muscular muy rápido, utilísimo para escapar de los depredadores.

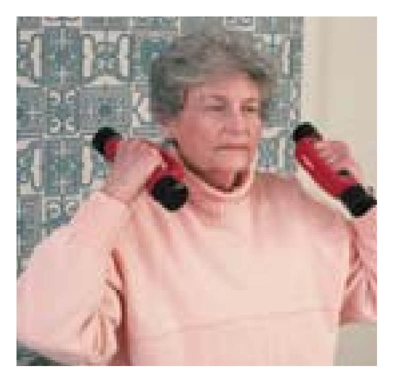
Las vacunas que insertarán genes artificiales en los núcleos de las cé-

ENVEJECIMIENTO MUSCULAR

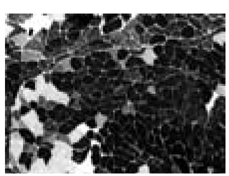
Con la edad nuestros músculos se debilitan y pierden ligereza. ¿A qué atribuirlo?

El envejecimiento comporta muchos cambios de los músculos esqueléticos. El que llama más la atención es la pérdida de masa, que comienza a los 25 años. Llegados a los 50, hay ya un 10 por ciento menos; a los 80 se ha perdido un 50 por ciento aproximadamente. Esta merma asociada a la edad viene causada por la pérdida de fibras musculares. Los ejercicios de fuerza pueden frenar la pérdida de masa del músculo en conjunto, al aumentar el volumen de las fibras, si bien no evita la disminución de su número.

Antes de atrofiarse, las fibras cambian de forma y aspecto. En un corte histológico, las fibras musculares de los jóvenes se distinguen por su carácter angular; en los ancianos suelen ser más redondeadas y en casos extremos con forma de plátano. El envejecimiento parece, además, estimular la "agrupación en tipos": en los músculos de individuos jóvenes y de mediana edad las fibras rápidas y lentas se alternan siguiendo el patrón de un tablero de ajedrez, mientras que en el músculo senil las fibras se agregan formando grupos de células lentas o rápidas (este fenómeno se manifiesta también en gente joven que padece ciertas enfermedades del sistema neuromotor).







EL LEVANTAMIENTO DE PESAS limita la pérdida de masa muscular que acompaña al envejecimiento. Pero nada puede evitar los cambios en la forma y la distribución de los diferentes tipos de fibra (músculo joven, *superior*; músculo senil, *inferior*).

Algunos fisiólogos atribuyen la agrupación en tipos del músculo envejecido a un proceso complejo en el que los nervios que controlan el músculo cambian de una fibra muscular a otra. La unidad motora comprende todas las fibras musculares controladas, o "inervadas", por un único nervio motor que parte de la médula espinal. Al envejecer, algunos de estos nervios motores "mueren". Las fibras musculares del nervio dejan de recibir estímulos, se atrofian y mueren, a menos que sean reinervadas por otro nervio motor vecino.

Si una fibra muscular se reinerva con un nervio de un tipo distinto de unidad motora —así, si una fibra muscular rápida se reinerva con un nervio de fibras lentas— la fibra se quedará con señales en conflicto. Atendiendo a su desarrollo, se trata de una fibra rápida; pero recibe estímulos que conduce a un patrón de activación propio de una fibra lenta. A la larga, parece que este cambio en la estimulación transforma la fibra rápida en fibra lenta (o viceversa, en el caso opuesto).

El envejecimiento es más pernicioso para las fibras rápidas, que se atrofian a un ritmo mayor de lo que lo hacen las lentas. Se venía creyendo que el cambio gradual en la distribución de las fibras lentas y rápidas favorecía a las fibras lentas. Esto explicaría por qué un chico de 10 años deja atrás a su septuagenario abuelo en una carrera de 100 metros lisos, mientras que éste le gana en una carrera de fondo de 10.000 metros.

Se trata, sin embargo, de una hipótesis controvertida, pues no ha podido demostrarse el aumento previsto de la cantidad relativa de fibras lentas. En un estudio reciente, abordamos el problema desde otro enfoque. Convencimos a un grupo de doce ancianos con una edad media de 88 años para que nos cediesen una biopsia de su músculo vasto lateral (que está situado en la parte frontal del muslo y es uno de los músculos esqueléticos humanos mejor estudiados). A partir de estas muestras, y operando con agujas finas bajo el microscopio, separamos las fibras y determinamos la composición de isoformas de miosina de 2300.

Sabemos que todos los humanos no tienen sólo fibras lentas y rápidas puras, sino también fibras que contienen a la vez las isoformas de miosina lenta y IIa (rápida) o las dos isoformas rápidas (IIa y IIx). En el músculo vasto lateral joven estas fibras híbridas son escasas: menos del 5 por ciento de las fibras contiene a la vez la miosina lenta I y la isoforma de miosina rápida IIa. En nuestros ancianos, un tercio de todas las fibras examinadas contenía ambas isoformas de miosina. Esta fibra híbrida era el tipo predominante en los músculos muy seniles.

La cuestión de si el músculo senil tiene más fibras lentas no puede dirimirse con un simple sí o no. No se trata de un cambio en la proporción entre fibras lentas y rápidas, sino de un obscurecimiento de la frontera entre fibras lentas y rápidas. En el músculo muy senil un tercio de las fibras no son estrictamente ni lentas ni rápidas, sino algo intermedio.

lulas musculares, serán, a buen seguro, las sustancias estimuladoras (dopantes) del futuro. A lo largo de la historia del deporte hubo siempre quien abusara de los estimulantes. El Comité Olímpico Internacional y otros organismos han venido prohibiendo tales compuestos, con pruebas de control y sanciones. La invención de nuevas sustancias impone la invención de nuevas pruebas de detección. En un futuro próximo, cuando los atletas utilicen terapias génicas, estaremos en una situación inédita, en la que quizá resultará imposible identificar como foráneos los elementos genéticos y las proteínas cifradas por ellos en las células musculares.

En la mayoría de los países desarrollados la terapia génica constituye, por razones múltiples, un campo intenso de investigación. En lugar de tratar las enfermedades muscula-

res con medicamentos, se espera ofrecer al organismo los instrumentos para fabricar las proteínas necesarias para su curación. Se trata de estrategias viables, al menos en teoría, desde el momento en que se cosecharon los primeros éxitos en la obtención de copias artificiales de genes humanos. Tales genes pueden introducirse en el cuerpo humano donde, en muchos casos, sustituyen un gen defectuoso.

Igual que nuestros genes, los artificiales son de ADN. Se pueden administrar al cuerpo de varias maneras. Si suponemos que el gen determina una de las muchas proteínas u hormonas de señalización que estimulan el crecimiento del músculo, el camino directo sería inyectar el ADN en el músculo. Las fibras musculares captarían el ADN y lo incorporarían en su acervo génico.

Pero ese método no resulta muy eficaz. Se prefiere el empleo de virus que transporten la carga génica hasta el núcleo celular. A grandes rasgos, un virus no es más que un conjunto de genes empaquetados en una cápside proteica capaz de engarzarse a una célula e inyectar los genes. Se sustituyen genes propios del virus por el gen artificial, que pasará sin dificultad a las células del cuerpo.

Mas, a diferencia de la inyección directa de ADN, la carga génica artificial no penetra sólo en las fibras musculares, sino también en otras, de manera singular en las células sanguíneas y hepáticas. La expresión del gen artificial en un tipo celular distinto del pretendido comportará, sin duda, efectos secundarios. Una sobreexpresión del gen en el músculo cardíaco podría producir una cardiomegalia, con riesgo de insuficiencia cardíaca. Para obviar ese problema se trabaja en otra línea, que comporta extraer del paciente los tipos celulares específicos, incorporar el gen artificial en el laboratorio y reintroducir las células en el organismo.

Si, como es de temer, los atletas abusaran de tales técnicas, las autoridades deportivas se verán en graves apuros para descubrir el fraude, pues los genes artificiales producirán proteínas idénticas a las naturales. Bastará una inyección, y no se detectará el ADN introducido a menos que se conozca el genoma de las células modificadas. Por eso los laboratorios encargados de los análisis deberán contar de antemano con muestras del tejido. Pero, ¿se prestarán los atletas a una biopsia antes de la competición? No parece previsible y mucho tememos que el dopaje génico escape a todo control.

Un nuevo mundo feliz

¿Cómo será el atletismo en la era de la potenciación del rendimiento por métodos genéticos? Imaginemos la final de 100 metros lisos de los Juegos Olímpicos del año 2012. Tras las semifinales, los corredores de apuestas ya habían arriesgado por el corredor de la calle cuatro, John Doeson, quien ya en octavos de final rompió en tres centésimas de segundo el récord mundial vigente. En cuartos de final batió la plusmarca en quince centésimas. En semifinales rebajó el récord mundial a unos increíbles 8,94 segundos, y cruzó la meta más de diez metros por delante del segundo. Los periodistas comentaban en televisión que se estaba asistiendo a "algo fuera de este mundo".

No del todo, pero casi. En 2012 la terapia génica es una técnica médica muy difundida. Doce meses antes de las olimpiadas, un médico planteó a Doeson una propuesta capaz de tentar a cualquier velocista. ¿Qué le parecía si lograra que sus células musculares expresaran la isoforma IIb de miosina? En condiciones normales, esta isoforma no se expresa en el hombre, pero el gen está en los músculos del esqueleto, listo para actuar.

Esta isoforma conferiría a las fibras musculares unas celerísimas características funcionales. La presentan la rata y otros micromamíferos que necesitan huir como balas para eludir a los depredadores. La isoforma IIb se contrae mucho más deprisa que las fibras IIx o IIa y, por ende, genera mayor potencia. Aunque Doeson no acababa de entender de qué le estaban hablando, sí retuvo las palabras "velocidad" y "energía".

El médico prosiguió. El gen expresa un factor de transcripción, proteína que a su vez activa el gen de la isoforma IIb de la miosina. Al factor de marras, descubierto hacía poco, lo llamaban velocifina. Levantando un minivial ante la mirada de Doeson, declaró: "Este es el ADN del gen artificial de la velocifina. Con sólo unas partículas en tus cuádriceps, poplíteos y glúteos, tus músculos empezarán a producir velocifina, que activará el gen de la miosina IIb. De aquí a tres meses, tus músculos contendrán una buena proporción de fibras IIb, condición que te permitirá batir el récord de los 100 metros lisos con facilidad. Tus músculos continuarán sintetizando velocifina durante años sin más inyecciones. Y sin una biopsia muscular de los cuádriceps, los poplíteos o los glúteos, nadie sabrá de esta modificación genética."

Doeson se encamina ahora a la pista. Recuerda que el médico le había asegurado que era un tratamiento exento de efectos secundarios. De momento, todo perfecto. Se sitúa en la cuarta calle. "¡Preparados. Listos. BANG!" Un par de segundos después, Doeson saca ya dos metros al pelotón, ventaja que aumenta con el paso de los segundos. Sus zancadas son visiblemente más poderosas y frecuentes que las del resto. Se siente bien al pasar los 30, 40 y 50 metros. De repente, en los 65 metros, siente una punzada en el poplíteo. En los 80 metros la punzada se convierte en un dolor insoportable cuando contrae su músculo poplíteo. Una décima de segundo después, el tendón de la rótula de Doeson cede, incapaz de resistir las fuerzas brutales generadas por su músculo cuádriceps. El tendón de la rótula arranca parte del hueso de la tibia, que se quiebra, y el cuádriceps entero sale disparado por todo lo largo del hueso fémur. Doeson cae, su carrera deportiva se acabó.

A medida que la genética comience a introducirse en la praxis médica se producirán cambios profundos en los deportes, no siempre beneficiosos. La sociedad debe preguntarse si las nuevas plusmarcas y otros laureles atléticos son en realidad una simple continuación del empeño por demostrar lo que nuestra especie puede dar de sí.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE CYTOSKELETON. Bruce Alberts et al. en *Molecular Biology of the Cell* (tercera edición). Garland Publishing, 1994.

MUSCULAR AGAIN. Glenn Zorpette en SCIENTIFIC AMERICAN PRESENTS: *Your Bionic Future*, vol. 10, n.º 3, páginas 27-31; otoño de 1999.

THE MYSTERY OF MUSCLE. Glenn Zorpette en SCIENTIFIC AMERICAN PRESENTS: *Men-The Scientific Truth*, vol. 10, n.º 2, páginas 48-55; verano de 1999.

SOMBRAS DE OTRAS TIERRAS

Los astrónomos, que han encontrado docenas de planetas gigantes allende nuestro sistema solar, no han avistado todavía ninguna Tierra nueva

Laurance R. Doyle, Hans-Jörg Deeg y Timothy M. Brown

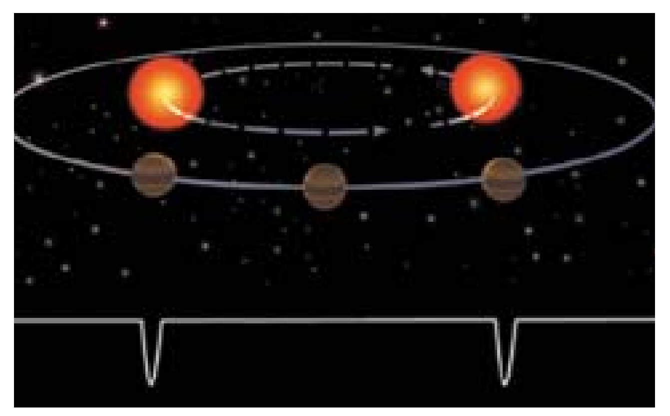
Nadie ha visto nunca un planeta fuera de nuestro sistema solar. Pero en noviembre de 1999 dos astrónomos observaron su mejor sustituto, la sombra. David Charbonneau, alumno de la Universidad de Harvard, analizaba el brillo de una estrella de tipo solar, HD 209458, con datos recabados con anterioridad, mientras trabajaba con uno de los autores (Brown). Por la misma fecha y por una vía independiente, Greg Henry, astrónomo de la Universidad estatal de Tennessee, observaba la misma estrella.

Se trata de un cuerpo modesto, carente incluso de nombre propio. Tiene, sin embargo, algo que lo ha catapultado a la fama: gira a su alrededor un planeta dotado de una masa, como mínimo, dos terceras partes de la de Júpiter. O eso era lo que los astrónomos pensaban.

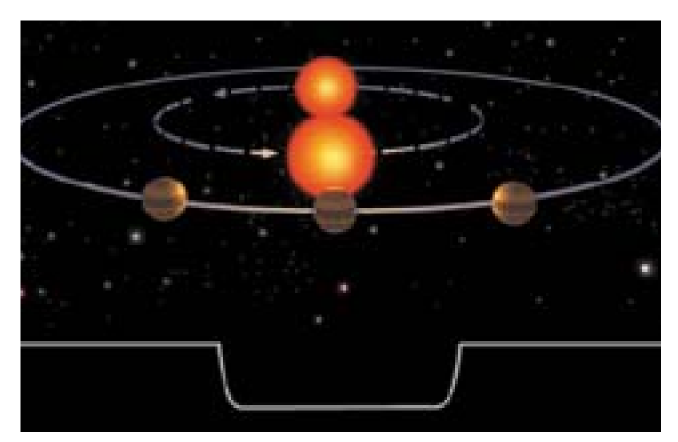
1. ¿PLANETA DE TIPO TERRESTRE en órbita alrededor de la estrella binaria CM Draconis? Los autores han observado un pequeño debilitamiento rítmico en la luz recibida de la estrella, signo verosímil de un planeta que pasa por delante. Se confirme o no, la técnica de buscar oscilaciones en el brillo estelar es, por ahora, el método mejor que poseen los astrónomos para descubrir mundos habitables.



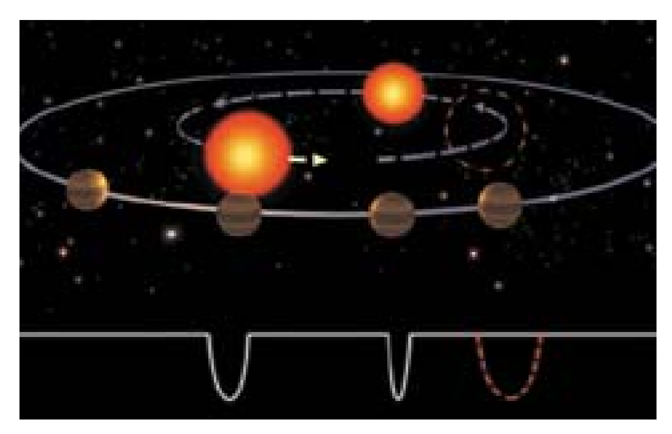
2. AHORA SE VE, AHORA APENAS SE DISTINGUE. Tal es la idea subyacente bajo el método de los tránsitos para la detección de planetas. Considérese un planeta de un sistema estelar binario. En esa tarea, los astrónomos no observan las dos estrellas por separado; la luz recibida es una combinación de las de ambas. A medida que el planeta pasa por delante de cada estrella desde nuestra perspectiva, el sistema aparentemente se debilita de una forma determinada. La cantidad precisa de obscurecimiento y su duración dependen de la ubicación de las estrellas y de su órbita común.



Máxima separación aparente entre las estrellas. El planeta realiza un doble tránsito; tras pasar por delante de una, lo hace luego por delante de la otra.



Si el planeta cursara por delante cuando una estrella eclipsa a la otra, el tránsito duraría más y debilitaría más el brillo del sistema.



Si el planeta pasa por delante justo antes del eclipse estelar, se produce un triple tránsito: primero atraviesa el disco de la estrella cercana, luego el de la estrella lejana (aunque con una menor duración, pues el planeta y la estrella se mueven en sentidos opuestos) y finalmente pasa por delante de la más alejada otra vez.

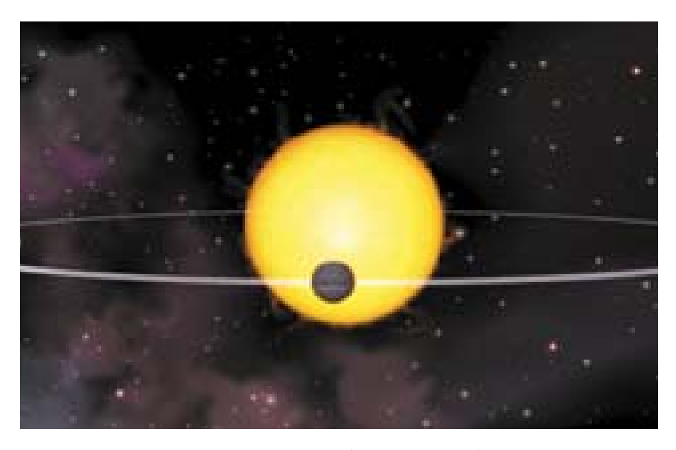
La presencia del planeta se había deducido por un método indirecto, a través de los efectos de vaivén que él provocaba en la estrella. Charbonneau y Henry obtuvieron la confirmación definitiva mediante una técnica distinta. ¿Cabría, se preguntaron, que el planeta pasara por delante de la estrella en nuestra dirección de visión y que, por unos momentos, bloqueara la luz que nos llega de la estrella?

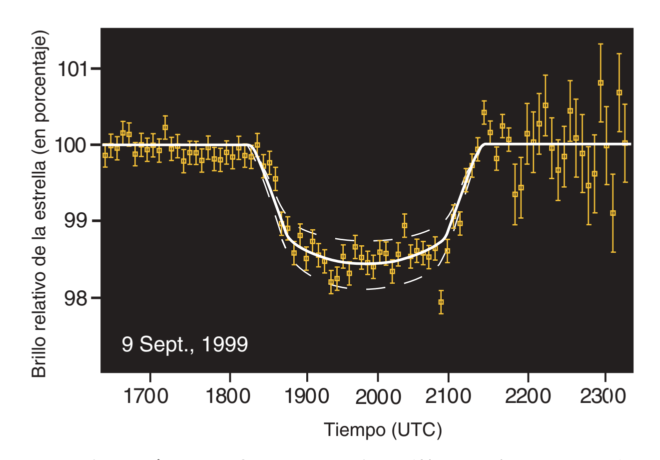
Desde nuestra atalaya, la estrella se debilitaría según una pauta característica. Ese tránsito —así se llama el suceso— requiere que la órbita del planeta tienda un ángulo coincidente con el de nuestra dirección de visión, lo que no resulta tan improbable como pudiera parecer en un principio. Para los planetas que giran en órbitas muy ceñidas a las estrellas, tal en HD 209458, la probabilidad de un alineamiento adecuado es de 1 entre 10. Antes de que Charbonneau y Henry observaran su estrella, la mayoría de las demás con planetas extrasolares identificados se habían investigado ya en busca de tránsitos en las mismas; sin éxito. No faltaron astrónomos que se preguntaron si semejante falta de tránsitos no indicaría una carencia de planetas. Quizá las observaciones de los efectos de vaivén se estaban interpretando de forma incorrecta.

Los estudios de Charbonneau y Henry disiparon todas las dudas. En el preciso instante en que las observaciones de vaivén revelaban la posibilidad del tránsito, se debilitó la estrella en un 1,8 % durante un intervalo de tres horas. Además de constituir una confirmación clara de la presencia del planeta, la caída de brillo ha permitido medir su diámetro, cifrado en 1,3 veces el del planeta Júpiter; se trata de la primera medición tomada de un planeta extrasolar. El tamaño coincidía con las predicciones teóricas de que el planeta, al hallarse tan próximo a su estrella, se ha hinchado.

El método del tránsito había tenido un comienzo prometedor. Hasta entonces, los cazadores de planetas se habían basado principalmente en la técnica del vaivén. Este método de la velocidad radial —como se la denomina en el argot científico— busca desplazamientos sutiles y periódicos en el espectro de una estrella; si existen, significa que hay un compañero invisible que está empujando la estrella hacia delante y hacia atrás. La técnica se apuntó su primer éxito en 1995 con el descubrimiento de un planeta alrededor de la estrella de tipo solar 51 Pegasi. Desde entonces, los astrónomos han contado más de tres docenas de planetas similares. Podemos aplicar la técnica de velocidad radial a cualquier estrella, pero pierde eficacia en la detección de mundos pequeños o muy alejados de sus estrellas.

Cierto es que el método del tránsito adolece de una grave limitación: exige un alineamiento orbital fortuito. Ahora bien, cuando los tránsitos ocurren, revelan el tamaño del planeta y otras propiedades, incluso en el caso de un mundo muy pequeño. De hecho, la técnica del tránsito es el único método capaz de rastrear planetas del tamaño de la Tierra que orbitan en torno a estrellas de tipo solar. Dos de los autores (Doyle y Deeg) se han servido de ese método para investigar el sistema estelar CM Draconis en busca de mundos como la Tierra. Podemos observar cuerpos de sólo dos veces y media el diámetro terrestre. Quiere ello decir que ha echado a andar la primera búsqueda de planetas extrasolares con potencial para albergar la vida tal como la conocemos.





3. EL PRIMER EXITO del método del tránsito fue la confirmación de la presencia de un planeta alrededor de la estrella de tipo solar HD 209458. La caída del 1,8 % en el brillo de la estrella (*puntos con barras de error*) implica la existencia de un planeta con un diámetro 1,3 veces el de Júpiter (*línea continua*); un mundo un 10 % mayor o menor ejercería un efecto parecido (*líneas discontinuas*). Las observaciones policromáticas tomadas recientemente sugieren un diámetro de 1,6 veces el de Júpiter. Los errores de medición son mayores al final del tránsito porque durante las observaciones la estrella se hallaba muy próxima al horizonte.

Una mancha negra en el Sol

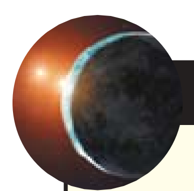
No es nueva la idea de rastrear los tránsitos. Después de todo, un eclipse solar viene a ser un tránsito de la Luna por delante del Sol. Johannes Kepler predijo tránsitos de Mercurio por delante del Sol a principios del siglo XVII; James Cook realizó su primer viaje a los mares del Sur para contemplar el de Venus en 1769. Los astrónomos se valen hoy de esos episodios para triangular la distancia de la Tierra al Sol. La hipótesis sobre la observación de tránsitos en estrellas distintas del Sol fue sugerida en una pequeña nota por Otto Struve, del Observatorio de Yerkes, en 1951. La desarrollaron Frank Rosenblatt, de la Universidad de Cornell, en 1971, y William Borucki, del Centro Ames de Investigación de la NASA, a principios de 1980.

Durante el tránsito de Mercurio o Venus, los astrónomos observan el deslizamiento de una pequeña mancha negra a lo largo del disco solar. Pero los tránsitos de los planetas extrasolares se detectan sólo de forma indirecta. Los observadores deben controlar la curva de luz de la estrella —una gráfica que consiste en ver las variaciones de brillo en función del tiempo— y buscar una caída recurrente que sea característica de un planeta que pase por delante. De la medición cuidadosa de la luminosidad estelar se ocupa la fotometría, una subdisciplina de la astronomía. Podemos observar a simple vista cambios en el brillo de una estrella si éstos son de un factor próximo a 2,5. Al comparar el brillo de dos estrellas, en un procedimiento llamado fotometría diferencial, el ojo habituado puede discernir cambios mucho más sutiles. Los telescopios pequeños equipados con modernas cámaras con detectores de carga acoplada (CCD) alcanzan precisiones del 0,1 por ciento. Los telescopios mayores, al recolectar más luz y al promediar las irregularidades atmosféricas, obtienen mejores resultados.

Las mediciones fotométricas del tránsito son, en potencia, más sensibles a la detección de los planetas menores que otros métodos de búsqueda. Podría entenderse tal sensibilidad en función de la señal que queremos medir, es decir, en función de la cantidad de la luz estelar que el planeta intercepta. Esta señal, directamente proporcional a la sección eficaz del planeta, varía, por tanto, con la razón entre el cuadrado del radio del planeta y el cuadrado del radio de la estrella. Por contra, el efecto de vaivén en la velocidad radial de la estrella es proporcional a la relación de la masa del planeta y la masa de la estrella; varía, pues, con la relación de los cubos de sus radios. Dado que los planetas son mucho menores que las estrellas —el radio de Júpiter es un 10 % del radio solar y el de la Tierra un 1 %— la razón entre cuadrados es menor que la razón entre cubos, lo que actúa en favor de las mediciones de los tránsitos.

La detección marginal del tránsito en HD 209458 necesitó unos 40.000 fotones de luz, mientras que la medición del vaivén con el mismo grado de confianza requirió unos 10 millones de fotones. Por supuesto, estos fotones se utilizaron de diferente forma: en el método del tránsito, los fotones se contaron en función del tiempo con un fotómetro; en el método del vaivén, se dividieron en varias bandas estrechas de longitud de onda por un espectrómetro. Pero el resultado es que el método fotométrico puede utilizar telescopios menores para encontrar planetas de un tamaño determinado. Un mundo de la talla de Júpiter ocasionaría que el brillo de su estrella decayera en un 1 %, valor que está dentro de la precisión instrumental de un telescopio de 1 metro; un mundo del tamaño de la Tierra lo haría en un 0,01 %, lo que trasciende la capacidad de los mayores telescopios operativos. Pese a todo, podemos alcanzar la precisión requerida mediante trucos especiales de observación y diversas técnicas de recogida de señal.

Hemos de tomar, asimismo, en consideración la distancia entre el planeta y su estrella. La sensibilidad del método del vaivén decae con el cuadrado de esa distancia, por la sencilla razón de que los mundos más lejanos ejercen menor atracción gravitatoria sobre sus estrellas. Y existe una tendencia clara en los resultados obtenidos con este método, puesto que la mayoría de los planetas encontrados tienen tamaños como el de Júpiter y se encuentran en órbitas muy pequeñas. Sin embargo, la técnica de los tránsitos detecta con pareja facilidad los planetas bien alineados, se hallen distantes o próximos a la estrella. Sobre la posición relativa entre la estrella, el planeta y el observador reposa un efecto



PLANETAS: INFORME DEL PROGRESO REALIZADO, **por Ray Jayawardhana**

LOS MUNDOS DEL VAIVEN

La cuenta se eleva ahora a 44 (**). Este es, hasta la fecha, el total de planetas detectados que giran en torno a estrellas cercanas similares al Sol. No pasa mes sin que los telescopios distribuidos por el ancho mundo —Hawai, California, Massachusetts, Chile, Australia, Francia— añadan nuevos hallazgos. Pese a este ritmo vertiginoso, las búsquedas alcanzan sólo a planetas bastante grandes y en órbitas muy próximas a sus soles. Lo que no obsta para que se hayan descubierto tendencias sorprendentes, que ponen en aprieto nuestra interpretación del origen y formación de la diversidad de sistemas planetarios.

Los 44 planetas mencionados se han encontrado midiendo los vaivenes evidenciados por las estrellas conforme los planetas giran a su alrededor. Si la estrella se desplaza hacia nosotros en respuesta al empuje gravitatorio del planeta, las líneas del espectro estelar se trasladan hacia el azul, de longitudes de onda más cortas. Si la estrella se aleja, las líneas se mueven hacia el rojo. Midiendo estos sutiles corrimientos Doppler periódicos en el tiempo, los astrónomos deducen la órbita y la masa mínima del planeta o de los planetas.

"Sutil" es el término apropiado. En el caso de Júpiter o de un mundo análogo, el efecto es sólo de 12,5 metros por segundo en un período de 12 años. Las líneas espectrales del Sol en la parte visible del espectro (alrededor de los 500 nanómetros), por ejemplo, se desplazarían apenas 0,00002 nanómetros. En el caso de la Tierra, la velocidad ondularía en sólo un decímetro por segundo.

A pesar de todas las limitaciones de la técnica, sus resultados han entusiasmado a los astrónomos. Primero se halló un planeta con la masa aproximada de Júpiter en órbita muy cerrada alrededor de la estrella 51 Pegasi; tan sólo dista 0,05 unidades astronómicas (la distancia Tierra-Sol). Nadie había imaginado que se diera una órbita tan prieta. Poco después del anuncio realizado en 1995 por Michel Mayor y Didier Queloz, del Observatorio de Ginebra, el equipo liderado por Geoffrey W. Marcy y R. Paul Butler, entonces en la Universidad estatal de San Francisco, informó del descubrimiento de dos planetas más alrededor de dos estrellas cercanas. Uno de ellos, en torno a la estrella 70 Virginis, añadió una nueva sorpresa: su órbita es muy excéntrica, o elíptica, lo que no ocurre con los planetas de nuestro sistema solar.

A tenor de las búsquedas realizadas en 800 estrellas de la vecindad solar, parece que sólo en una veintena que son similares a nuestro Sol se han encontrado planetas gigantes en su entorno. Algunos recuerdan el caso de 51 Pegasi: planetas en órbitas muy cerradas y circulares. Otros guardan un parecido mayor con el planeta de 70 Virginis: se hallan en órbitas más amplias, aunque elongadas. Al menos uno de los sistemas, Hypsilon Andromedae, presenta varios planetas alrededor de la misma estrella. Se sospecha que en 55 Cancri y otras estrellas pudiera haber familias de planetas.

Gracias a las mejoras realizadas en la precisión de las medidas de velocidad radial, el equipo de Marcy y Butler ha descubierto dos planetas con apenas la masa de Saturno, aproximadamente un tercio de la masa de Júpiter. A su anuncio en marzo no tardó en seguirle el hallazgo de un tercer planeta saturniano por el equipo suizo. Estos resultados refuerzan la hipótesis sobre la abundancia común de planetas de masa menor. Sin embargo, en el extremo más masivo de la escala, las enanas marrones —estrellas fracasadas de 10 a 80 veces la masa de Júpiter— parecen escasear más de lo imaginado. Ese fenómeno podría indicar que los procesos de formación que originan a las enanas marrones y los planetas son muy distintos, y que los mundos más pequeños surgen con mayor facilidad que los de mayor masa.

Las órbitas elongadas siguen envueltas en el misterio. Dado que los planetas nacen en discos de gas y polvo que circundan a las estrellas, los efectos de fricción y roce deberían haber redondeado sus órbitas. ¿Cómo se las han arreglado el sistema de 70 Virginis y otros mundos similares para obviar dicho proceso? Los cometas de nuestro propio sistema solar podrían darnos una pista. Según se cree, los encuentros cercanos con los planetas impulsan a los cometas hacia órbitas elípticas. Quizá los propios planetas participen de este juego de tira y afloja. Si es así, nuestro sistema solar, con casi todos los planetas en órbitas circulares, debería ser la excepción, no la regla. En algunos casos, pensemos en la estrella 16 Cygni B, la influencia gravitatoria de una estrella binaria compañera podría ser la causante de la distorsión orbital.

Algunos investigadores llaman la atención sobre cierta propiedad de las estrellas que albergan exoplanetas: tienden a presentar elevadas concentraciones de elementos más pesados que el hidrógeno y el helio. Podría ello deberse a que los planetas nunca se formarían, a menos que la estrella y sus cercanías alcancen una cantidad crítica de elementos pesados. Se ha sugerido también que estas estrellas se han enriquecido en metales tras devorar planetas recién constituidos en su entorno.

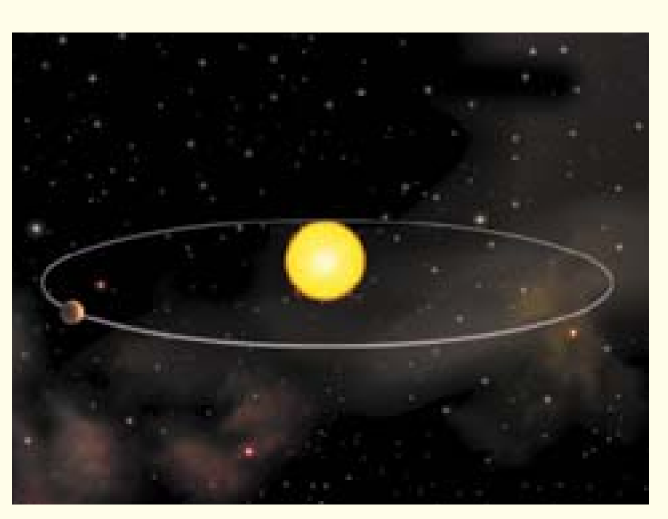
Mientras se sigue reflexionando sobre tales misterios, aparecerán nuevas detecciones de exoplanetas a medida que se rastreen más estrellas con mayor precisión y períodos de tiempo más prolongados (para así poder observar planetas de largo período). Las mediciones Doppler alcanzan ya los 3 metros por segundo, grado de precisión que está en camino de refinarse. Los investigadores se hallan preparados para la detección de planetas como Urano y Neptuno, con un magro 5 % de la masa de Júpiter. Pero la técnica Doppler se detiene ante la barrera de 1 metro por segundo; a estas escalas, las manchas estelares y otras inhomogeneidades de la superficie de las estrellas impedirán obtener precisiones me-

geométrico simple. Comparado con los años-luz de separación entre una estrella y la Tierra, la distancia entre la estrella y su planeta resulta despreciable; podría ésta alterarse en cantidades considerables y, no obstante, desde nuestra perspectiva, la cantidad de luz debilitada permanecería casi la misma.

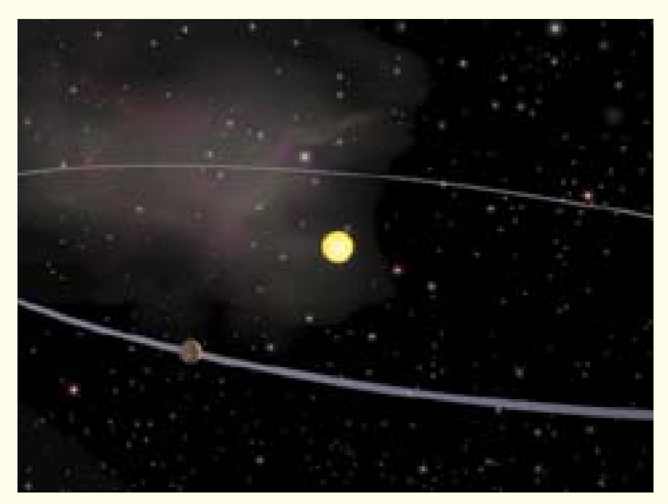
Planetas alrededor de estrellas

Mas, al aumentar la distancia entre la estrella y su planeta, se reduce la probabilidad de que el planeta coincida en una órbita que nos permita observar sus tránsitos. (Así, la probabilidad de que la Tierra en

Nombre de la estrella	Masa mínima (en unidades de Júpiter)	Excentricidad de la órbita	Semieje mayor (UA)
HD 16141	0,22	0,28	0,350
HD 168746	0,24	0,00	0,066
HD 46375	0,25	0,00	0,041
HD 108147	0,34	0,56	0,098
HD 83443	0,35	0,00	0,038
HD 75289	0,42	0,05	0,046
51 Peg	0,47	0,00	0,051
BD-10 3166	0,48	0,00	0,046
HD 187123	0,52	0,03	0,042
HD 209458	0,69	0,00	0,045
Ups And b	0,71	0,03	0,059
HD 192263	0,76	0,03	0,150
HD 38529	0,77	0,27	0,129
55 Cnc	0,84	0,05	0,110
HD 37124	1,04	0,19	0,585
HD 130322	1,08	0,05	0,088
Rho CrB	1,1	0,03	0,23
HD 52265	1,13	0,29	0,49
HD 217107	1,28	0,14	0,070
HD 177830	1,28	0,43	1,00
HD 210277	1,28	0,45	1,097
16 Cyg B	1,5	0,67	1,700
HD 134987	1,58	0,25	0,780
GJ 876	2,1	0,27	0,210
Ups And c	2,11	0,18	0,830
HD 92788	2,12	0,44	0,99
HD 82943	2,24	0,61	1,16
Iota Hor (HR 810)	2,26	0,16	0,925
47 UMa	2,41	0,10	2,10
HD 12661	2,8	0,33	0,827
HD 169830	2,96	0,34	0,823
14 Her	3,3	0,35	2,50
HD 1237 (GJ 3021)	3,31	0,51	0,49
HD 195019	3,43	0,05	0,14
Tau Boo	3,87	0,02	0,046
GJ 86	4,23	0,05	0,11
Ups And d	4,61	0,41	2,50
HD 168443	5,04	0,54	0,277
HD 222582	5,4	0,71	1,35
HD 10697	6,59	0,12	2,00
70 Vir	6,6	0,40	0,43
HD 89744	7,2	0,70	0,880
HD 114762	10,93	0,34	0,351
HD 162020	13,73	0,28	0,072

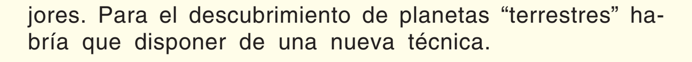


El planeta alrededor de 51 Pegasi ejemplifica uno de los dos tipos de órbitas planetarias observadas (*filas de color azul en la tabla*): muy cerradas y circulares.



El planeta alrededor de 70 Virginis ilustra el otro tipo de órbita planetaria (*filas de color negro en la tabla*): más amplias y elípticas.

Para mayor información véase "Planetas gigantes de lejanas estrellas", por Geoffrey W. Marcy y R. Paul Butler; TEMAS DE INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, n.º 15 (Sistemas solares), primer trimestre 1999.

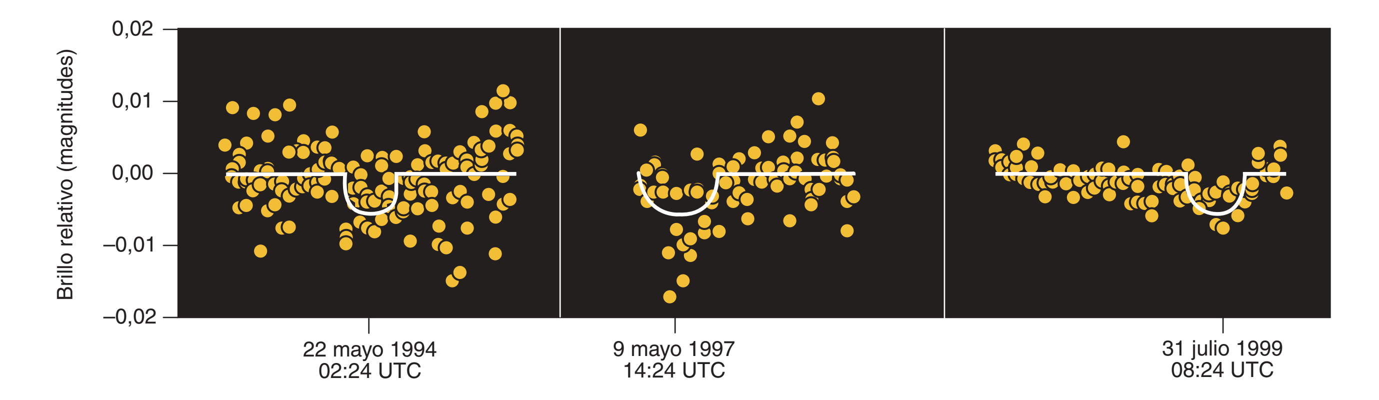


jores. Para el descubrimiento de planetas "terrestres" habría que disponer de una nueva técnica.

RAY JAYAWARDHANA investiga el origen de los planetas en la Universidad de California en Berkeley.

(**) Nota: en el momento de realizarse la traducción (15 de septiembre de 2000), el número total de planetas detectados por la técnica Doppler se elevaba a 50. Se confirmaba, pues, el creciente ritmo de descubrimientos (María Rosa Zapatero Osorio).

su órbita actual transite por delante del Sol, tal y como lo vería un astrónomo extraterrestre ocasional, es inferior al 0,5 %.) De ahí que el método de los tránsitos se desechara en un comienzo. Dos avances movieron a cambiar de opinión. El primero fue el hallazgo de planetas extrasolares gigantes muy cercanos a sus estrellas primarias, no en órbitas alejadas, que es lo que ocurre en nuestro sistema solar. Las órbitas ceñidas decuplican la probabilidad de hallar tránsitos alineados. El segundo avance lo constituyó la aparición de los sistemas de imagen de gran campo, que pueden rastrear decenas o cientos de miles de estrellas de golpe. La explicación



4. ¿PURO RUIDO? ¿Hay algún planeta escondido en estos valores del brillo de la estrella CM Draconis (*puntos*)? Para distinguir las variaciones aleatorias que introduce la atmósfera de la Tierra del propio debilitamiento en la luz provocado por el tránsito del planeta, los autores buscan estructuras que se repitan en la curva de luz. Las líneas sobre los datos representan el obscurecimiento esperado por culpa de un cuerpo con 2,5 veces el diámetro de la Tierra que se encuentra en una órbita de 23 días.

es sencilla: si se analizan muchas estrellas en un tiempo suficiente, algunas deberán presentar tránsitos. En consecuencia, los astrónomos no sólo pueden confeccionar listados de planetas, sino que, además, les está permitido realizar una estadística de su frecuencia.

Hay en marcha varias inquisiciones sobre el particular. Se proponen, en su mayoría, detectar planetas gigantes, como el que se encuentra alrededor de la estrella HD 209458. El proyecto STARE (dirigido por Brown) y el proyecto Vulcano (encabezado por Borucki, David Koch, del Centro Ames de la NASA y Jon Jenkins, del Instituto SETI en Mountain View, California) cartografían el disco de la Vía Láctea, rico en estrellas. Al mismo tiempo, Andreas Quirrenbach, de la Universidad de California en San Diego, lidera la caza de planetas en cúmulos estelares, grupos de cientos o miles de estrellas que nacieron simultáneamente. Puesto que puede averiguarse la edad del cúmulo estelar, si se encuentran planetas los astrónomos conocerán automáticamente la de éstos.

Se ha realizado en fecha reciente otro rastreo con el telescopio espacial *Hubble*. El equipo, dirigido por Ron Gilliland, del Instituto de Ciencias del Telescopio Espacial, y Brown, observó el cúmulo globular 47 Tucanae durante un intervalo de 8 días. Hizo un seguimiento de 34.000 estrellas; esperaban, por estadística, encontrar 17 tránsitos. Pero no han hallado ninguno. Los astrónomos no entienden el motivo de tales resultados negativos. Quizás el cúmulo carezca de planetas porque las estrellas son pobres en su contenido de los elementos pesados que constituyen los planetas o porque la proximidad entre las estrellas ha roto la órbita de los planetas a lo largo de los 10.000 millones de años transcurridos desde que el cúmulo se originó.

Pese a ello, se trata de empeños que cosechan datos valiosos sobre el mecanismo de formación de los planetas y su abundancia. Ahora bien, al centrarse en estrellas bastante grandes y observarlas en un intervalo de tiempo breve —se proponen detectar tránsitos aislados y no la presencia de un modelo recurrente—, las búsquedas apuntan hacia planetas gigantes gaseosos, los cuales no pueden contener vida tal como la que conocemos. Para rastrear mundos habitables, Doyle y Deeg se han embarcado en otro tipo de observaciones. Se han concentrado en estrellas menores, que, además, presentan el alineamiento adecuado para cartografiar los tránsitos. Se investiga el tiempo suficiente que permita detectar tránsitos múltiples, construyendo de esta forma una señal notable, aun cuando el tránsito sea muy débil y no pueda detectarse por sí mismo.

Para comprender el significado del primer objetivo, consideremos qué comporta construir un hogar para los seres vivos. La bioquímica "terrestre" requiere agua líquida; para que un planeta posea agua líquida debe hallarse a una distancia determinada de su estrella. Si el planeta está demasiado cerca, padece un efecto invernadero importante. Según los trabajos de James Kasting, de la Universidad estatal de Pennsylvania, de Dan Whitmire, de la Universidad del Sur de Louisiana, y de Ray Reynolds, del Centro Ames, la estratosfera del planeta se satura con vapor de agua, y los rayos del sol rompen la molécula de agua en oxígeno e hidrógeno, expulsándose el hidrógeno al espacio exterior. El resultado último es un planeta seco y muy caliente, como Venus. De forma análoga, si el planeta estuviera situado demasiado lejos de la estrella, se manifestaría el efecto nevera. Se originan gases como el dióxido de carbono que se depositan en forma de nieve; puesto que la nieve refleja más radiación que la roca en sí, el efecto nevera se ve reforzado con el consecuente enfriamiento posterior. El planeta acaba inmerso en criotemperaturas, como la de Marte.

Las estrellas menores que el Sol son también más frías; sus zonas de habitabilidad se encuentran, pues, más cercanas. Esta mayor proximidad favorece, a su vez, la posibilidad de detectar tránsitos. Además, un planeta de cierto tamaño da lugar a una mayor señal cuando atraviesa el disco de una estrella pequeña. Por tanto, sería alrededor de estas estrellas donde podríamos detectar con mayor facilidad planetas que potencialmente alojaran formas de vida.

LAURANCE R. DOYLE, HANS-JÖRG DEEG y TIMOTHY M. BROWN llevan buscando planetas extrasolares desde principios de los años noventa. Se valen de métodos fotométricos. Doyle se halla adscrito al Instituto SETI de Mountain View. Deeg trabaja en el Instituto granadino de Astrofísica de Andalucía, aunque accede a menudo a los telescopios de las islas Canarias. Brown estudia en el Centro Nacional de Investigación Atmosférica en Boulder, cuyo telescopio tiene una apertura efectiva de 2,5 pulgadas (aproximadamente 6,5 cm), lo que facilita un amplio campo de visión.

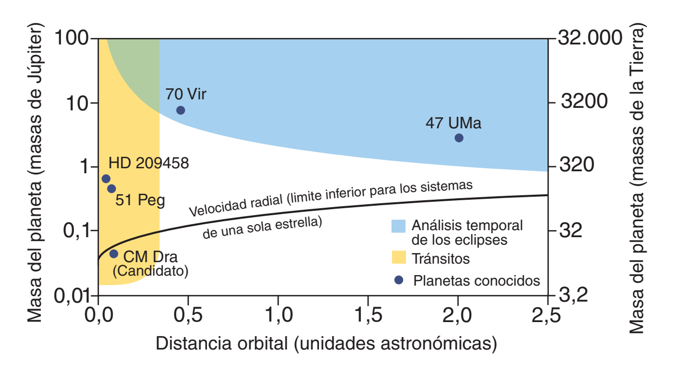
Sombras de otras Tierras

La segunda característica de las estrellas de nuestra muestra estriba en que parecen tener la alineación adecuada para las observaciones de tránsitos. Las hemos tomado de un catálogo astronómico de sistemas binarios eclipsantes; así se denominan las estrellas dobles con planos orbitales tales, que son paralelos a nuestra dirección de visión. Los astrónomos infieren esta orientación a partir de la variación distintiva del brillo de dichos sistemas: las dos estrellas se ocultan de suerte que diríase que cada una pasa exactamente frente a la otra. Astrónomos profesionales y aficionados han venido identificando miles de estrellas binarias eclipsantes. Aparte de su orientación fortuita, se trata de sistemas harto comunes entre las binarias. Pueden tener órbitas planetarias estables siempre que la distancia entre las estrellas y el planeta cuadruplique al menos la separación entre las estrellas. El planeta giraría alrededor del sistema con normalidad, salvo que existirían dos soles en el cielo en vez de uno.

Las binarias eclipsantes son un regalo del universo para el cazador de planetas, como apuntaron ya Jean Schneider y Michel Chevreton, del Observatorio parisiense de Meudon. Los astrónomos teóricos creen que, si los planetas se formaran en sistemas binarios, se asentarían en el mismo plano orbital que las dos estrellas. De ocurrir tal, la probabilidad de observar un tránsito es del 100 %. Cuando ese planeta curse ante las estrellas progenitoras, ocasionará un doble debilitamiento de la luz, pues interceptará la radiación recibida de una estrella primero, y luego la de la otra estrella. La forma del doble debilitamiento dependerá de la configuración geométrica del sistema.

En 1994 organizamos una red internacional del tránsito de planetas extrasolares (TEP) con el fin de que los telescopios de la clase 1 metro buscaran mundos similares a la Tierra alrededor de CM Draconis, uno de los menores sistemas binarios eclipsantes conocidos. Consta de dos estrellas muy pequeñas y frías, con una edad aproximada de 9000 millones de años, situadas a unos 54 años-luz del Sol. Los planetas incursos en la zona de habitabilidad del sistema deben tener períodos orbitales en el rango de 18 a 35 días. Para lograr un rastreo exhaustivo de los planetas terrestres, la red TEP observó dicho sistema estelar durante más de 1000 horas. En los últimos seis años, han contribuido con datos desde sus respectivas longitudes Schneider, Valerij Kozhevnikov, de la Universidad estatal de los Urales, Brian Oediker, de la Universidad de Nuevo México, Eduardo Martín, del Instituto de Tecnología de California, J. Ellen Blue, del SRI International en Menlo Park, y Efthimious Paleologou, de la Universidad de Creta.

El problema radica en distinguir del ruido de las observaciones la señal del tránsito. Conforman el ruido variaciones de la atmósfera de la propia Tierra, inestabilidades de los instrumentos empleados, variabilidad intrínseca de las estrellas en estudio y demás. Para nuestra fortuna, los tránsitos en binarias eclipsantes siguen un patrón característico y predecible, hasta el punto de que nuestro algoritmo, desarrollado con Jenkins, puede detectar planetas aun cuando el obscurecimiento que éstos originan sea inferior al ruido de los datos. Para reconocer al planeta en medio del ruido, comparamos todos los modelos posibles y analizamos cuál se ajusta a las observaciones. En 1000 horas de datos fotométricos pueden esconderse muchísimos modelos; para no perder ninguna posibilidad, comparamos más de 400 millones de modelos con nuestras observaciones. Se llama "filtro de ajuste" a este método de correlación. Entre todas, sólo nueve posibilidades que involucran la presencia de un planeta con un radio 2,5 veces superior al de la Tierra, respondieron a nuestra búsqueda. Se ha realizado ese test para comprobar si siguen dándose tránsitos. Sólo quedan ahora dos posibilidades, una con un planeta en una órbita de 21 días y otra con un planeta en una órbita de 26 días. Mientras tanto, hemos extendido nuestra técnica al estudio de cientos de estrellas binarias eclipsantes.



5. VENTAJAS Y DESVENTAJAS de los diversos métodos para la detección de planetas. La figura ilustra la sensibilidad del método para planetas de masa (*eje vertical*) y separación determinadas respecto de las respectivas estrellas (*eje horizontal*). Incluso en su límite teórico, el método de la velocidad radial (*línea de color negro*) se pierde los planetas menores que Saturno, salvo que se encuentren en órbitas muy pequeñas. El método del tránsito puede detectar cuerpos del tamaño de la Tierra; las limitaciones prácticas restringen esta técnica a planetas muy próximos a sus estrellas (*color amarillo*), pero las misiones espaciales futuras cubrirán el diagrama entero. El método basado en la medición temporal de los eclipses (*color azul*) puede hallar los planetas distantes de sus estrellas más fácilmente que los cercanos.

El reloj de los mundos

Los tránsitos podrían terminar incluso revelándonos la presencia de satélites en torno a los planetas. Al provocar desviaciones suaves en el movimiento orbital del planeta, los satélites alteran la pauta temporal del tránsito. Si hubiera, por ejemplo, astrónomos extraterrestres que siguieran el comportamiento del Sol, descubrirían un ligerísimo debilitamiento en la luz cada 365,24 días; deducirían así la presencia de la Tierra. Con el paso de los años, sin embargo, los tránsitos tendrían lugar hasta dos minutos antes o después, lo que implicaría la existencia de un satélite (una vez que se han tenido en cuenta otros efectos orbitales). Y si la fotometría de los extraterrestres fuera de muy alta precisión, detectarían incluso un ligero debilitamiento extra en la luz, causado por la luna.

Los tránsitos no son la única vía fotométrica para detectar la presencia de planetas en torno a estrellas. El sistema binario eclipsante constituye una suerte de reloj; los eclipses estelares ocurren en intervalos regulares de tiempo. Si el reloj no mantuviera el intervalo, podría significar que hay un cuerpo invisible que atrae las estrellas. Si un planeta con la masa de Júpiter atrajera a las estrellas y las alejara de nosotros, por ejem-

plo, los eclipses ocurrirían unos segundos más tarde, ya que la luz tardaría algo más en llegar desde las estrellas hasta la Tierra. Cuanto más alejado esté el planeta y de mayor masa goce, habrá una mayor diferencia en el tiempo. Los planetas gigantes pueden detectarse, pues, sin necesidad de que transiten por delante de los discos estelares. Aprovechando datos cosechados con anterioridad, los astrónomos han establecido límites para la presencia de planetas gigantes en algunos sistemas estelares. Así, CM Draconis no contiene ningún cuerpo con una masa superior a tres veces la del planeta Júpiter, ni ningún cuerpo más cercano que la órbita de la Tierra.

La fotometría de alta precisión y las observaciones durante varios años permiten una investigación ulterior, la de la luz reflejada de un planeta. Los planetas muy próximos a sus estrellas deben reflejar una cantidad perceptible de luz estelar. Presentarán cambios de fase similares a los que experimenta la Luna cada mes; en consecuencia, provocarán una modulación de la curva de luz estelar, que se distingue de otros tipos de variaciones en el brillo de la estrella. Con esta técnica podemos descubrir cuerpos cuyas órbitas tarden una semana o menos. Podríamos incluso sondear la naturaleza del planeta en sí mismo; en efecto, los planetas con superficies rugosas causarían variaciones mayores que los planetas con superficies lisas. Un método similar consiste en buscar la luz reflejada en el espectro de la estrella. El grupo encabezado por Andrew Collier Cameron, de la Universidad escocesa de St. Andrews, anunció en 1999 la detección de la luz reflejada del planeta gigante que gira en torno a la estrella Tau Bootis, pero sus resultados no están exentos de controversia.

Si consideramos que las mayores fuentes de error en la medición de las curvas de luz de las estrellas residen en la atmósfera de la Tierra, resulta manifiesto que la observación de las estrellas desde el espacio exterior redundaría en provecho de la investigación. Un observatorio espacial podría alcanzar precisiones fotométricas del orden del 0,002 %. Hay varias misiones en fase de proyecto. Se prevé lanzar el satélite europeo COROT para el 2004; su sensibilidad posibilitará detectar planetas de sólo el doble del tamaño de la Tierra. El observatorio Eddington de la Agencia Espacial Europea, en el que uno de nosotros (Deeg) ha venido trabajando, podría incluso encontrar planetas como la Tierra. La misión más ambiciosa se la reserva el satélite Kepler, de la NASA. Controlará 170.000 estrellas en la constelación del Cisne y, si la estadística no falla, debería detectar tránsitos de más de 600 planetas terrestres, así como la luz reflejada de unos 1700 planetas gigantes cercanos a sus estrellas. Estos mundos se convertirían en los blancos obvios para los interferómetros espaciales de cancelación, capaces de anular la luz procedente de las estrellas y de facilitar imágenes reales de los planetas. Durante los tránsitos, los planetas recibirán luz de sus estrellas; los iluminarán desde atrás, lo que hará más fácil su examen espectroscópico para así detectar señales potenciales de ozono, agua y metano, es decir, de vida.

Cuantos laboramos en este campo nos sentimos privilegiados por ser testigos de la época de los descubrimientos. El astrónomo del Renacimiento Christiaan Huygens escribió: "¡Qué maravilloso y sugestivo guión tenemos de este magnífico y vasto universo! ¡Cuántos Soles, cuántas Tierras!". ¿Andaba en lo cierto Huygens? ¿Existen otros planetas como el nuestro? ¿Están habitados? Así que pasen diez años, lo sabremos.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

A TRANSITING "51 PEG-LIKE" PLANET. Gregory W. Henry, Geoffrey W. Marcy, R. Paul Butler y Steven S. Vogt en *Astrophysical Journal*, vol. 529, n.º 1, págs. L41-L44; 20 de enero, 2000.

DETECTION OF PLANETARY TRANSITS ACROSS A SUN-LIKE STAR. David Charbonneau, Timothy M. Brown, David W. Latham y Michel Mayor en *Astrophysical Journal*, vol. 529, n.º 1, págs. L45-L48; 20 de enero, 2000. Preimpresión disponible en xxx.lanl.gov/abs/astro-ph/9911436 en la Red.

OBSERVATIONAL LIMITS ON TERRESTRIAL-SIZED INNER PLANETS AROUND THE CM DRACONIS SYSTEM USING THE PHOTOMETRIC TRANSIT METHOD WITH A MATCHED-FILTER ALGORITHM. Laurance R. Doyle *et al.*, en *Astrophysical Journal*, vol. 535, n.º 1, págs. 338-349; 20 de mayo, 2000. Preimpresión disponible en xxx.lanl.gov/abs/astro-ph/0001177 en la Red.

Para una descripción de otros muchos planetas, visítese la Enciclopedia de Planetas Extrasolares en www.obspm.fr/encycl/encycl.html.

En la ladera de una colina al sudoeste de Pennsylvania, a unos 115 kilómetros de Pittsburgh, se levanta uno de los edificios más famosos del mundo. La Casa de la Cascada (Fallingwater), creación emblemática de Frank Lloyd Wright, es todo un símbolo nacional desde su construcción en 1937. Más de dos millones de turistas han contemplado fascinados sus terrazas de hormigón suspendidas sobre un claro y caudaloso torrente. Según los críticos especializados esta construcción fue el logro máximo de Wright, y en 1991 el Colegio Norteamericano de Arquitectos la eligió como la mejor obra jamás realizada por un estadounidense.

Pese a todo, esta maravillosa estructura tenía su talón de Aquiles. El diseño de Wright no previó suficiente apoyo para la parte suspendida sobre el agua. De ahí que las famosas terrazas aéreas empezaran a ceder durante el mismo proceso de construcción, apareciendo anchas grietas en el hormigón. Y lo que es peor, la inclinación se fue acentuando a lo largo de sesenta años, hasta que en 1995 la Junta de Conservación de Pennsylvania, propietaria de la mansión, resolvió encargar a nuestra empresa, Robert Silman Associates de Nueva York, un análisis de los problemas estructurales de la Casa de la Cascada. Los resultados de nuestra investigación indicaron que las vigas que sustentaban la casa se seguían curvando y que, si no se hacía nada, el edificio entero terminaría por desplomarse.

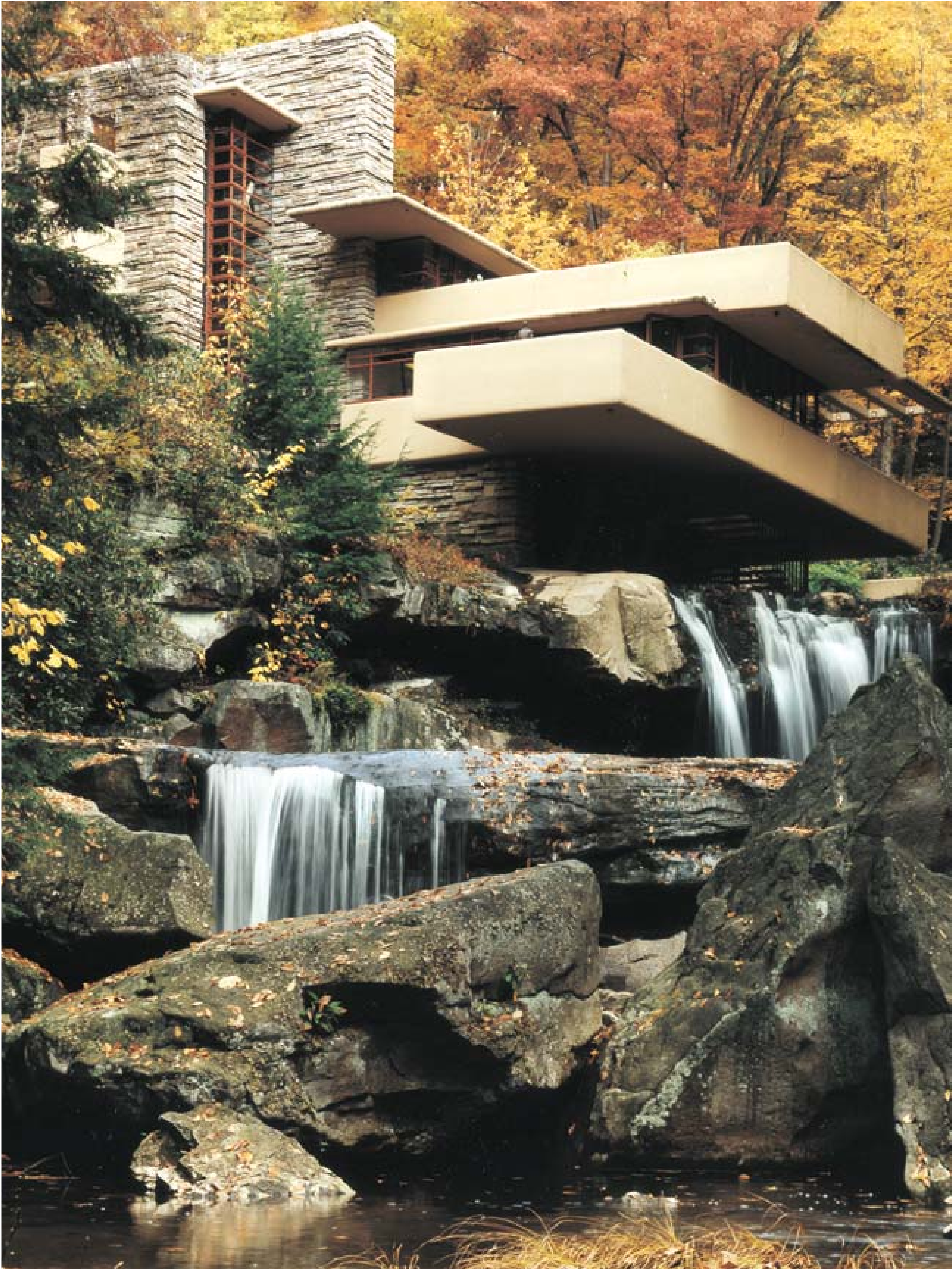
En 1996, la junta decidió, como medida transitoria prudente, apuntalar el edificio con vigas y columnas de acero, mientras que en nuestras oficinas se perfilaba un plan para consolidar la casa. Con anterioridad habíamos trabajado en otros dos edificios proyectados por Wright —la casa de Darwin D. Martin en Buffalo, Nueva York, y la de Wingspread en Racine, Wisconsin—, pero la Casa de la Cascada planteaba un desafío singular. Para determinar cómo aliviar las amenazadoras tensiones, nuestros ingenieros sondearon la estructura con pulsos de radar y ultrasonidos, que habrían de analizar luego. Paralelamente intentábamos recuperar el hilo lógico que guió a Wright y sus ayudantes en la obra. Por fin hemos podido dar una explicación razonable del error de diseño que afectaba a esta espectacular construcción.

La historia de la Casa de la Cascada se inicia en Edgar Kaufmann, propietario de unos prósperos almacenes en Pittsburgh hacia 1930. Su hijo, también Edgar Kaufmann, pasó un corto período de formación en el estudio que tenía Wright en su finca Taliesin, en Spring Green, Wisconsin. El hijo convenció al padre de que encargara a Wright ciertas obras en el negocio, así como el proyecto de una casa para los fines de semana familiares en terrenos anteriormente destinados al recreo veraniego de los empleados.

Restauración de la Casa de la Cascada

Esta obra señera del arquitecto Frank Lloyd Wright corría peligro de hundirse hasta que una firma de ingeniería encontró el modo de frenar su caída

Robert Silman





Entre los bosques que pueblan esta finca corre el llamado Arroyo del Oso, que cae en cascada sobre unos salientes rocosos. Los Kaufmann siempre habían pensado construir la casa curso abajo de las cascadas, para contemplarlas desde un nivel inferior. Pero Wright tuvo una idea genial: levantar la casa *encima* del salto, sobre una ancha plataforma de piedra arenisca que domina el torrente. El edificio, proyectado en 1935, empezó a construirse un año más tarde, siendo dirigido el diseño desde el estudio Taliesin, con destacada participación de Bob Mosher y Edgar Tafel, auxiliares de Wright. En el mismo estudio los ingenieros Mendel Glickmann y Wesley Peters realizaron los cálculos de la estructura.

Wright y sus ayudantes concibieron la Casa de la Cascada de manera que la parte que sobrevolaba el torrente se comportara como un voladizo autoportante. Igual que un trampolín, el voladizo tiene un extremo fijo y un extremo libre. El extremo fijo lo constituyen cuatro grandes cabeceras, tres de hormigón armado (hormigón con varillas de acero empotradas) y una de piedra, que se elevan desde la plataforma de arenisca hasta el primer piso del edificio. Cada cabecera soporta una viga horizontal de hormigón armado que sobresale unos 4,42 metros, en dirección sur, sobre el propio cauce del torrente. Unas viguetas de hormigón de 10 centímetros de anchura unen entre sí las vigas, formando con ellas una estructura reticular. Por encima de ese enrejado está el armazón de madera sobre el que descansa el pavimento de piedra del salón y las terrazas del primer piso.

Bajo las viguetas y vigas voladizas se extiende una plancha de hormigón que termina la estructura por su cara inferior. Wright eligió este diseño para dar un aspecto monolítico al exterior de la casa, aunque también con una finalidad funcional. En efecto, el voladizo tiene un momento flector negativo: la carga aplicada en el extremo libre de la viga horizontal queda contrarrestada por la tracción en la cara superior de la viga y la compresión en su cara inferior. (Por el contrario, el momento flector de un estante de librería es positivo, porque al peso de los libros se opone la compresión sobre la cara superior y la tracción sobre la cara inferior del estante.) Al decidir Wright que se colocara una plancha de hormigón bajo las vigas voladizas, éstas se convirtieron en vigas en "T" invertida, lo cual aumentaba su resistencia a la compresión y les permitía soportar una carga mayor.

Sin embargo, éste no es el único voladizo de la Casa de la Cascada.



1. ASPECTO INTERIOR del salón de la Casa de la Cascada. El suelo de piedra descansa sobre las vigas voladizas maestras. Las ventanas del lado sur están divididas por cuatro parteluces de acero que ayudan a soportar el peso del piso superior.

Las terrazas que se abren al este y al oeste del primer piso se apoyan en viguetas de hormigón que van bajo el suelo y en vigas de borde en los antepechos. Y en el segundo piso del edificio, directamente sobre el salón, la terraza del dormitorio principal sobresale del primer piso, avanzando 1,83 metros más hacia el sur. Cuatro parteluces de ventana en forma de T se alzan del borde sur del salón a la terraza superior. A primera vista, parece que su finalidad es puramente decorativa, pero al fin nos enteramos de que los parteluces de acero desempeñan un papel esencial en la estructura de la casa.

Aun antes de comenzar la construcción ya surgieron dudas sobre la solidez. Metzger-Richardson, la empresa de ingeniería de Pittsburgh que suministró las varillas de acero para el hormigón armado, insistió en que no había suficientes varillas en las vigas voladizas situadas bajo el salón. Para garantizar que las vigas pudieran resistir la flexión producida por la carga, la empresa puso en cada viga doble número de varillas de acero de una pulgada cuadrada, 16 en vez de ocho. Wright se enfureció al enterarse del cambio; creía que las varillas de acero añadidas aumentarían demasiado el peso de las vigas y debilitarían por tanto la estructura. En una airada carta a Kaufmann, padre, escribía: "He puesto en esta casa mucho más de lo que usted o cualquier otro cliente tendría derecho a esperar, y si no cuento con su confianza, váyase todo al diablo."

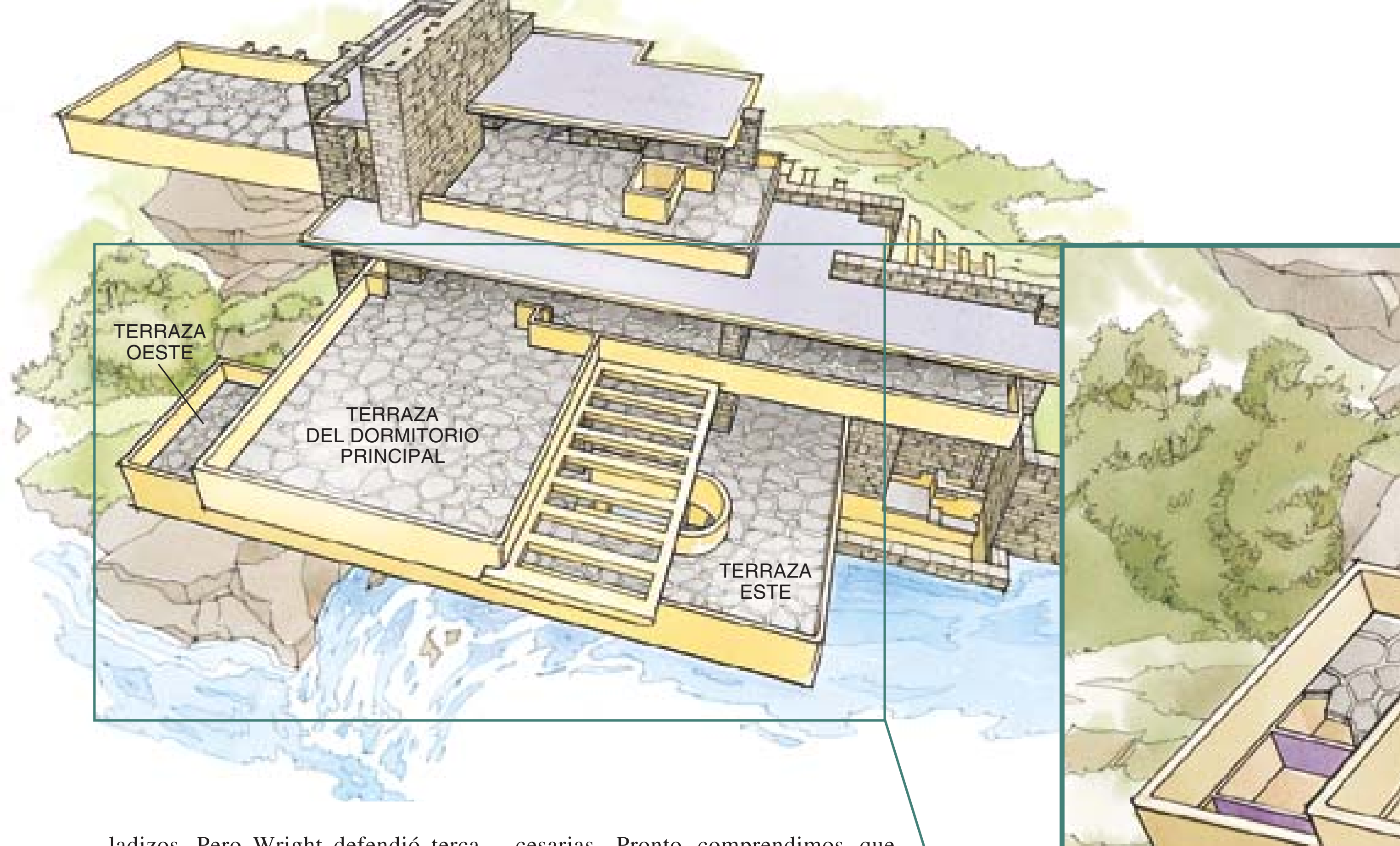
Kaufmann consiguió apaciguar al arquitecto reiterándole su confianza. Pero el error de Wright era evidente: si Metzger-Richardson no hubiera añadido varillas de acero a las vigas voladizas, éstas habrían cedido. Incluso ese incremento del refuerzo era insuficiente, como se descubrió durante la construcción de la Casa de la Cascada. Al retirar el encofrado de madera bajo el hormigón del primer piso, se detectó un desplazamiento instantáneo hacia abajo de 44,5 milímetros. No es raro que se produzca una pequeña desviación cuando se retira el andamiaje de una estructura de hormigón, pero en este caso la flexión resultaba llamativa. Mosher, destacado en la obra, telefoneó a su colega Glickmann en el estudio de Taliesin. Se cuenta que, tras revisar sus cálculos, Glickmann exclamó: "¡Dios mío, he olvidado el refuerzo negativo!"

Glickmann se refería al refuerzo necesario para compensar el momento flector negativo, que crea compresión en la cara inferior y tracción en la cara superior de cada viga voladiza. En una viga de hormigón armado, el hormigón resiste la compresión ejercida sobre la viga, mientras que las varillas de acero empotradas resisten la tracción. Las vigas voladizas de la Casa de la Cascada podían aguantar la compresión causada por el momento negativo, pero no había suficientes varillas en la parte superior de las vigas para compensar el esfuerzo de tracción.

El problema se agravó todavía más cuando se terminó el segundo piso. Poco después de retirar el encofrado del hormigón de la terraza del dormitorio principal, aparecieron dos grietas en los antepechos de la terraza. En 1937 Metzger-Richardson realizó pruebas de carga de la estructura y calculó que las vigas voladizas sufrían esfuerzos que se aproximaban a los márgenes de seguridad, o incluso los sobrepasaban. La firma recomendó entonces instalar puntales permanentes sobre el lecho del torrente para dar apoyo al primer piso y reducir así la longitud de los vo-



2. GRIETAS EN LOS ANTEPECHOS de la terraza del segundo piso, resultado de los esfuerzos que sufre la estructura de hormigón (*izquierda*). Durante 18 meses se midió la anchura de las grietas con monitores electrónicos, lo que confirmó su crecimiento (*abajo*).



ladizos. Pero Wright defendió tercamente su diseño, y una vez más puso a Kaufmann en el disparadero de elegir entre él y la empresa de ingeniería. Kaufmann decidió entonces seguir con el proyecto original de la construcción.

Con todo, el propietario no dejó de preocuparse por la inclinación de las terrazas. Y contrató un servicio para medir las flexiones registrando con regularidad la elevación del borde superior de los muros de antepechos. Así se hizo desde 1941 hasta 1955, año en que Kaufmann murió. En 1963, su hijo donó la Casa de la Cascada a la Junta de Conservación de Pennsylvania. Entre 1955 y la contratación de nuestra compañía en 1995 sólo se midió una o dos veces, esporádicas, la inclinación de las terrazas.

Pesquisas de ingeniería

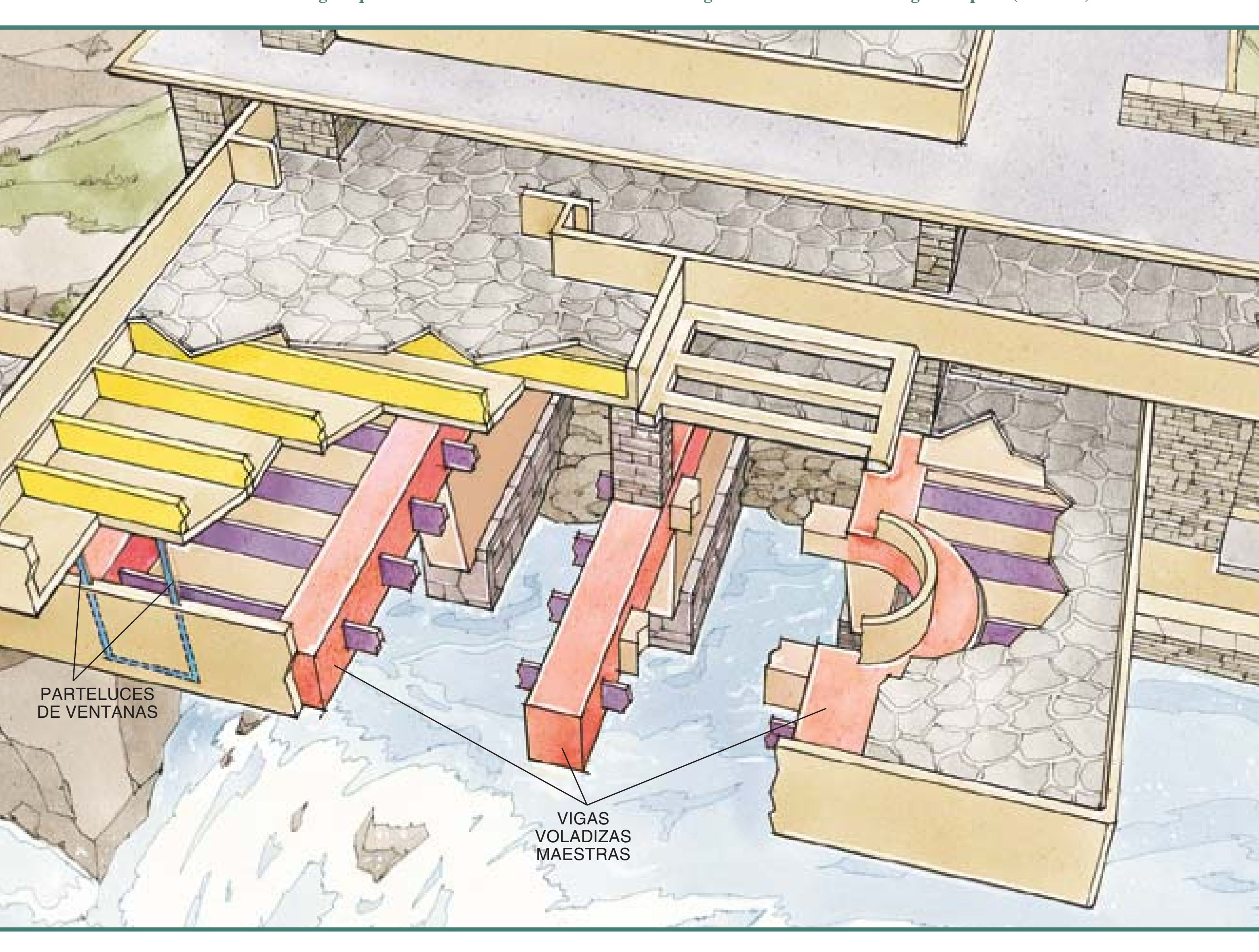
La junta pidió a nuestra firma una revisión de la estructura de la terraza del dormitorio principal, la parte del edificio donde siempre aparecían las grietas más profundas visibles. Se estaba entonces reparando la fachada de la casa, incluidas las grietas, y la entidad conservadora quería saber si merecía la pena seguir remediando estos desperfectos de un modo superficial sin emprender antes una revisión de la estructura y realizar las reparaciones necesarias. Pronto comprendimos que teníamos que ampliar la investigación al salón situado bajo la terraza, ya que las estructuras de ambos pisos son interdependientes.

Ante todo nos preguntamos si las desviaciones se habían detenido o seguían aumentando. Utilizando un nivel de burbuja tomamos mediciones de altura en más de 30 puntos y tratamos de relacionarlas con las lecturas efectuadas durante las inspecciones anteriores. Descubrimos así que el borde de la terraza oeste había descendido en 146 milímetros, y en 184 milímetros el borde de la terraza este. La flexión del extremo sur de la terraza del dormitorio principal rondaba los 114 milímetros. Instalamos monitores electrónicos para medir con precisión desplazamientos de las terrazas y cambios en la anchura de las grietas de los antepechos. Los resultados obtenidos durante año y medio, tras las oportunas correcciones de temperatura diarias y estacionales, confirmaron que las grietas se agrandaban y la flexión de las terrazas era cada vez mayor.

El paso siguiente era examinar el estado original de la estructura para determinar hasta qué punto se ajustaba al proyecto de Wright. En particular, teníamos que comprobar el número, el tamaño y las situaciones reales de las varillas de refuerzo en las vigas voladizas y otros elementos de la estructura. Se preparó un programa de evaluación no destructiva, sondeando el interior de vigas, suelos y antepechos con pulsos de radar, ultrasonidos y detección magnética de alta resolución. Así se obtuvieron también datos sobre la calidad del hormigón utilizado. El trabajo lo realizó la empresa GB Geotechnics, de Cambridge. El examen de las vigas voladizas maestras obligó a levantar varias losas del pavimento del salón para dar acceso al espacio hueco situado debajo.

A continuación procedimos a examinar la estructura de la casa. Metzger-Richardson lo había hecho ya en 1936 y 1937, pero queríamos hacer nuestro propio análisis del compor-

3. EL DISEÑO DE FRANK LLOYD WRIGHT combinaba vigas y antepechos de hormigón armado con pisos y paredes de piedra arenisca (*página opuesta*). Una sección de la parte de la casa que domina el Arroyo del Oso (*abajo*) muestra las cabeceras de hormigón que se levantan desde el suelo y sostienen las vigas voladizas horizontales (*rojo*). Las vigas se unen entre sí por viguetas de hormigón (*púrpura*). Los parteluces de acero de las ventanas (*azul*) empotrados en el antepecho del primer piso ayudan a soportar las viguetas de hormigón de la terraza del segundo piso (*amarillo*).



tamiento de la estructura. Para ello nos servimos de un modelo informático de simulación de la Casa de la Cascada y ensayamos tres hipótesis: que la terraza del dormitorio principal pueda soportarse a sí misma por acción del voladizo, que el salón sea un voladizo autoportante y que el salón a la vez se sustente a sí mismo y a la terraza del dormitorio principal. En cada caso, calculamos los momentos flectores que produciría el peso muerto de la casa. Y luego calculamos los esfuerzos resultantes sobre el acero y el hormigón de las vigas de sustentación, así como el grado de flexión inducido por estas cargas.

Si nuestro modelo informático predecía esfuerzos notablemente superiores al límite elástico del acero o del hormigón, alguno de los supuestos tenía que ser erróneo, pues un esfuerzo tan excesivo hubiera producido el inmediato desplome de la casa. Los ensayos del hormigón empleado indicaron una resistencia cercana a 34 megapascal (352 kilogramos por centímetro cuadrado). Recuperamos, asimismo, un pequeño fragmento del acero de refuerzo del edificio y lo enviamos a un laboratorio metalúrgico; el análisis mecánico dio por resultado un límite elástico ligeramente superior a 283 megapascal (2886 kilogramos por centímetro cuadrado).

En primer lugar, ensayamos la hipótesis de que la terraza del dormitorio principal pudiese autoportarse por la acción del voladizo. Si así fuera, nuestros cálculos revelaron que el esfuerzo sobre las varillas de refuerzo del antepecho de la terraza sería de 1195 megapascal, es decir, más de cuatro veces el límite elástico del acero. Tal supuesto no es, pues, admisible. A continuación, examinamos si el salón se comportaba como voladizo autoportante. El análisis demostró que el peso del salón, por sí solo, induciría esfuerzos tolerables: como máximo 152 megapascal sobre el acero de las vigas voladizas maestras y 16 megapascal



4. EL APUNTALAMIENTO transitorio instalado en 1997 asegura que la casa no se desplome antes de la reparación definitiva de su estructura. Desde el lecho del arroyo se levanta una hilera de columnas y traviesas de acero que sostienen la base de hormigón del primer piso en voladizo.

sobre el hormigón. Pero sabíamos, por el fallo de la primera hipótesis, que el salón no sólo se mantiene, sino que ha de soportar además la terraza del dormitorio principal. Si suponemos que el salón apuntala la terraza por medio de los parteluces de ventana en T de su lado sur, los cálculos predicen esfuerzos de 288 megapascal sobre el acero de las vigas voladizas maestras y 30 megapascal sobre el hormigón. Estos valores alcanzan niveles críticos, muy próximos a las cargas de ruptura de los materiales.

Además, las flexiones que tales esfuerzos producirían serían casi idénticas a la inclinación observada en las terrazas. El ordenador sólo nos proporcionaba las flexiones iniciales y no tomaba en cuenta la contracción y el deslizamiento posteriores del hormigón en las vigas voladizas. Se produce una contracción al fraguar el hormigón; el deslizamiento es una contracción continuada resultado de someter todo el tiempo el hormigón a una carga de compresión constante. La magnitud de la contracción y el deslizamiento depende de muchos factores, entre ellos la cantidad de acero de refuerzo y la calidad del hormigón. Al incorporar estos parámetros a nuestros cálculos se obtuvieron unas flexiones esperadas sorprendentemente próximas a las condiciones reales.

La conclusión lógica es que los parteluces de ventana en forma de T soportan, sin lugar a duda, el peso de la terraza del dormitorio principal. Nuestros ingenieros confirmaron que los parteluces podían resistir la carga: el esfuerzo máximo que soportarían sería de 64 megapascal, muy por debajo de su carga admisible de 112 megapascal (en el supuesto de que se vean reforzados por el hormigón del antepecho del salón). Más todavía: este peso adicional que aguantan los parteluces es el que ha elevado hasta niveles críticos los esfuerzos sobre las vigas voladizas maestras. No podemos saber con seguridad el origen de este fallo de diseño, pero el examen de la estructura sugiere un posible proceso: al darse cuenta los ingenieros de Wright de que la terraza del dormitorio principal no podía sostenerse a sí misma, rediseñaron los parteluces de las ventanas para que soportasen parte de la carga. Pero su fallo consistió en no rediseñar las vigas voladizas maestras para que resistieran el peso añadido.

ROBERT SILMAN preside una firma consultora de ingeniería, Robert Silman Associates, en Nueva York y Washington. Desde su fundación en 1966 el estudio ha realizado más de 7300 proyectos, entre ellos la renovación de 300 edificios emblemáticos, tales como el Tribunal Supremo de EE.UU., el Carnegie Hall, la mansión de George Washington en Mount Vernon y otras seis construcciones de Frank Lloyd Wright.

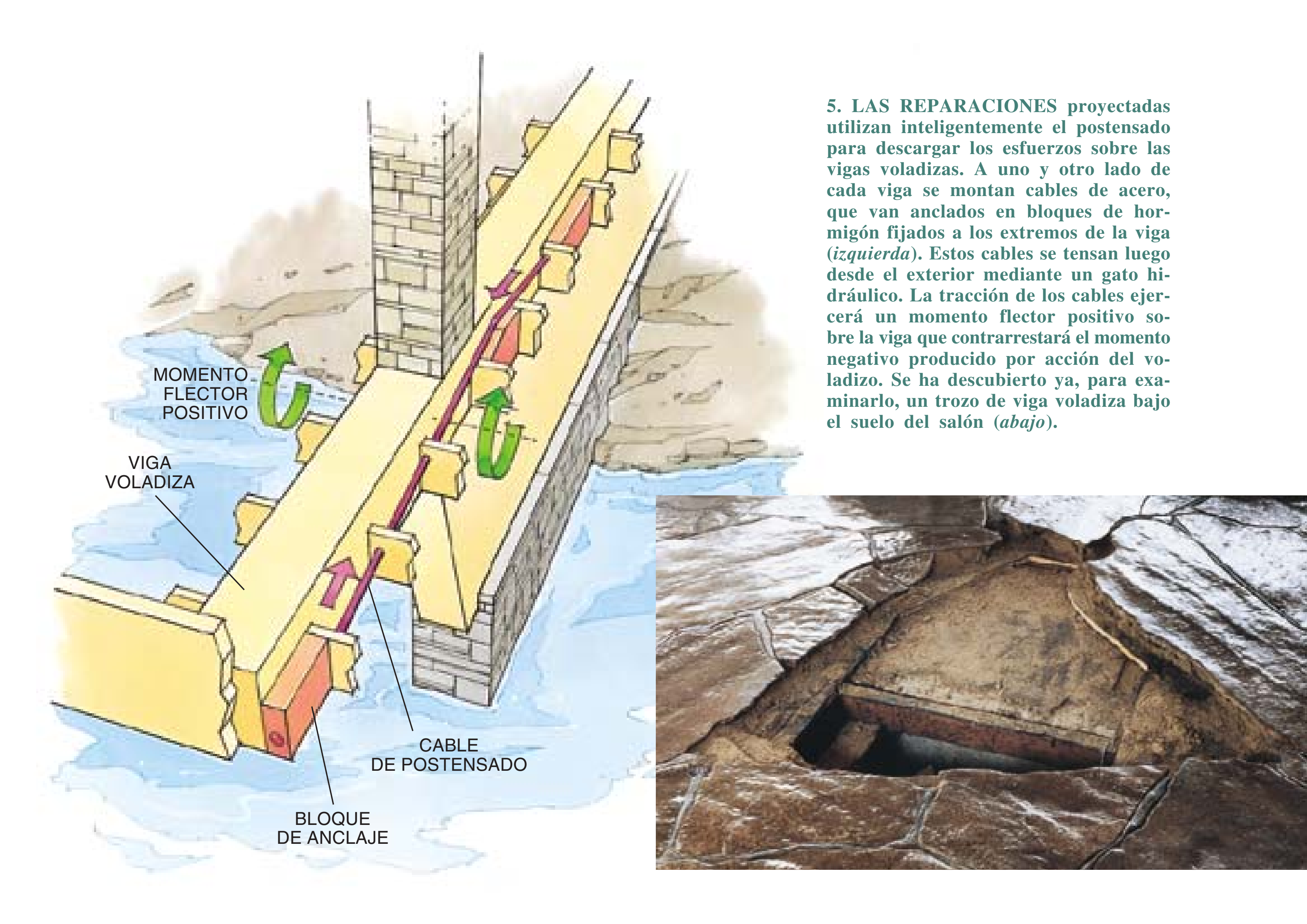
Consolidación de la Casa de la Cascada

Como era de esperar, los resultados de nuestro análisis, entregados en mayo de 1996, preocuparon a las autoridades de conservación. Nuestro estudio indicaba que los esfuerzos a que estaban sometidas las vigas voladizas maestras eran de magnitud suficiente para cuestionar la seguridad del edificio. En vista de ello, la junta decidió iniciar el proyecto de reparaciones permanentes. Les aconsejamos que, en la fase de construcción, sería necesario apuntalar los extremos de las vigas maestras mientras hubiera obras en curso. Como en último término habría que apuntalar la casa, los responsables optaron por hacerlo inmediatamente y así evitar que el edificio pudiera desplomarse o fallar algún elemento de su estructura antes de comenzar las reparaciones.

Así pues, en 1997 se instaló una hilera de columnas y traviesas de acero, no demasiado antiestética, que desde el mismo lecho del torrente sostienen la base del primer piso. Se apuntaló además una parte del propio cauce, la plataforma rocosa de arenisca sobre la cual salta la cascada. Esta plataforma de piedra se ha reforzado con riostras tubulares en una cueva situada detrás del salto de agua. El apuntalamiento transitorio garantiza la seguridad de los turistas que siguen visitando la casa, y se mantendrá hasta que terminen las reparaciones definitivas.

Tras un análisis de los esfuerzos existentes, determinamos que necesitaban refuerzo tres de las cuatro vigas voladizas en las que se apoya el salón. (La cuarta viga, la situada más al este, no requiere intervención por estar ya sostenida por un puntal de acero comprendido en la baranda de la escalera que desciende hasta el arroyo.) En la práctica, sólo hay una manera de proporcionar refuerzo suficiente sin alterar el aspecto exterior de la casa. Consiste en aplicar posteriormente una tensión (postensado) a las vigas maestras; es decir, unirlas a cables de acero de modo que la tensión de los cables alivie el esfuerzo que actúa sobre las vigas.

El plan de trabajo exige levantar transitoriamente el suelo de piedra del salón para tener acceso desde arriba a las tres vigas voladizas maestras. A uno y otro lado de cada viga, en el extremo sur —el que asoma sobre el arroyo—, se fijarán sendos



5. LAS REPARACIONES proyectadas utilizan inteligentemente el postensado para descargar los esfuerzos sobre las vigas voladizas. A uno y otro lado de cada viga se montan cables de acero, que van anclados en bloques de hormigón fijados a los extremos de la viga (*izquierda*). Estos cables se tensan luego desde el exterior mediante un gato hidráulico. La tracción de los cables ejercerá un momento flector positivo sobre la viga que contrarrestará el momento negativo producido por acción del voladizo. Se ha descubierto ya, para examinarlo, un trozo de viga voladiza bajo el suelo del salón (*abajo*).

bloques de hormigón. Dentro de cada bloque se insertará un conducto hueco de 6,35 milímetros de diámetro interior; estos conductos discurrirán al costado de las vigas, inclinándose hacia arriba y atravesando los orificios practicados en las viguetas de hormigón. Perforaremos también el antepecho sur por el exterior a fin de que puedan tenderse a través de los conductos los cables de alta resistencia que ejercen el postensado.

Los cables irán anclados en el extremo norte de cada viga. Por el extremo sur se tensarán desde el exterior utilizando un gato hidráulico, de tal manera que los cables tensos ejerzan un momento flector positivo sobre la viga voladiza. Este momento positivo contrarrestará esencialmente el momento negativo creado por efecto del voladizo, reduciendo la tracción sobre la cara superior de la viga y la compresión sobre la cara inferior. También fijaremos cables de postensado a las vigas de borde de los antepechos en las terrazas este y oeste para aligerar los esfuerzos sobre tales vigas. En el segundo piso se va a reforzar la sobrecargada vigueta de hormigón situada precisamente sobre los parteluces de acero de las ventanas, ya sea atornillando canales de acero a uno y otro lado de la vigueta o adhiriendo a la misma placas de fibra de carbono. A la terminación del proyecto, se taparán y pintarán los agujeros del antepecho, volverá a colocarse el suelo de piedra y se retirará el apuntalamiento transitorio.

Señalamos de antemano que la estructura se levantará ligeramente de su apuntalamiento cuando se apliquen las fuerzas de postensado, pero no pretendemos devolver las vigas voladizas a su nivel horizontal del principio. Es más, antes de tensar los cables vamos a rellenar las grietas de la parte superior de las vigas para limitar su desplazamiento hacia arriba. Una vez concluidas las obras de reparación, las terrazas quedarán todavía inclinadas pero su flexión ya no va a crecer más. Esta estructura curvada dará testimonio de la historia del edificio y los problemas que le han afectado.

Las obras de consolidación están programadas para el invierno de 2001 a 2002, como parte de un proyecto más amplio que incluye también la impermeabilización de la casa entera. Los trabajos serán supervisados por el estudio de arquitectura Wank Adams Slavin, de Nueva York. Por su parte, la junta de conservación está mejorando el suministro de agua y las instalaciones sanitarias de la finca.

El refuerzo de las vigas voladizas de la Casa de la Cascada garantizará la estabilidad estructural del edificio por muchos años. Por otro lado, el proyecto de consolidación no requiere plantar puntales permanentes en el lecho del arroyo. Gracias a las técnicas más avanzadas, puede preservarse el elemento arquitectónico más espectacular de la Casa de la Cascada: las terrazas voladizas que elegantemente asoman sobre el impetuoso torrente.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

FALLINGWATER: A FRANK LLOYD WRIGHT COUNTRY HOUSE. Edgar Kaufmann, Jr. Abbeville Press, 1986.

FRANK LLOYD WRIGHT'S FALLINGWATER: THE HOUSE AND ITS HISTORY. Segunda edición. Donald Hoffmann. Dover Publications, 1993.

Glenn Zorpette

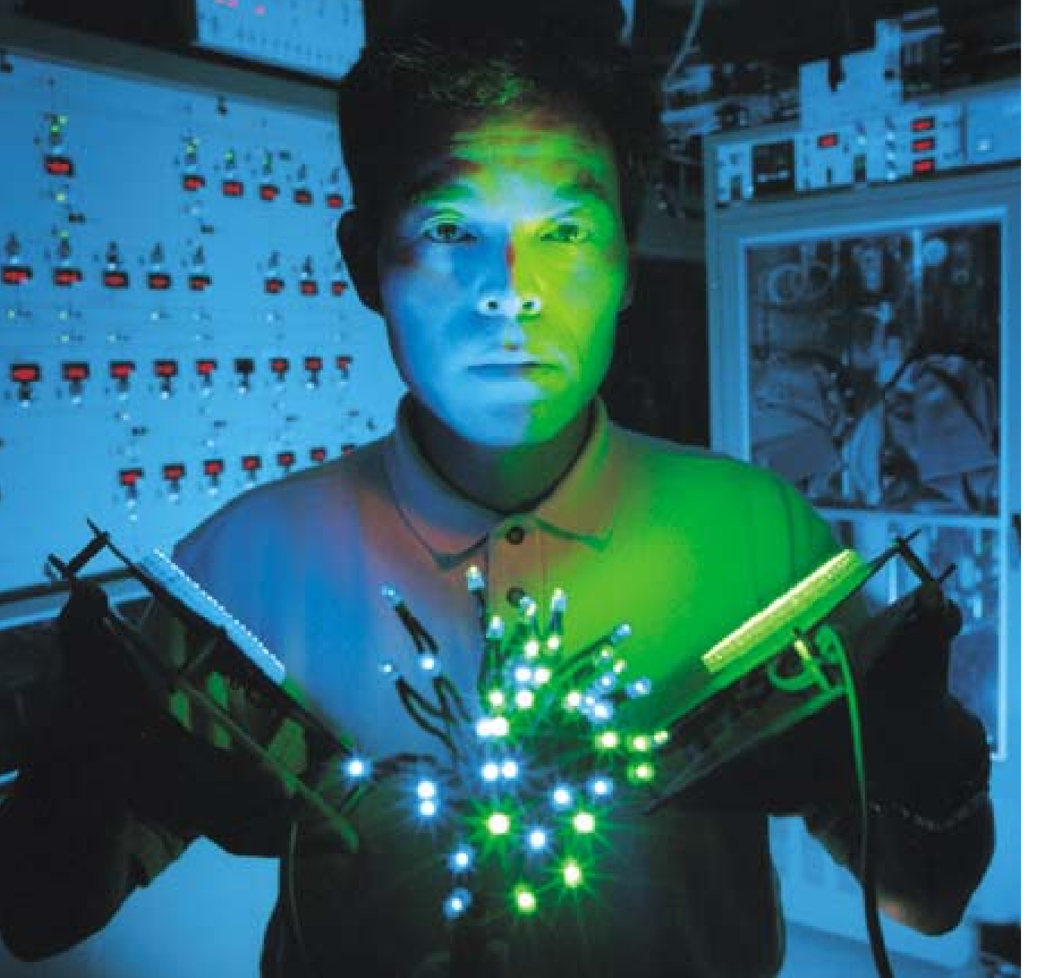
SHUJI NAKAMURA: Azul sin tacha

Shuji Nakamura ha batido a los grandes fabricantes de LED y láseres azules, con un invento que puede revolucionar la iluminación y el almacenamiento de datos.

Santa Bárbara (California). Aprieto un botón del comprobador portátil de diodos emisores de luz (LED); se encienden tres motas de plástico y semiconductor lanzando rayos que hieren los ojos. Los dos dispositivos azules emiten una tonalidad intensa, que rivaliza con la del cielo, sin el menor asomo de violeta. El verde es nítido, puro, sin ese matiz fantasmal y amarillento con el que hasta hace poco debía conformarse el que quisiera un LED "verde". Vale decir, hasta que el hombre que me sonríe abiertamente, Shuji Nakamura, tuvo algunas ideas brillantes.

Nakamura, la última incorporación en la escuela de ingeniería de la Universidad de California en Santa Bárbara, dejó pasmados a sus colegas a finales de 1999, cuando les participó que dejaba Nichia Corporation, otrora una anodina compañía que fabricaba fósforo para tubos de rayos catódicos y lámparas fluorescentes. Gracias a Nakamura, Nichia elabora hoy día los mejores LED azules y verdes del mundo y el único láser semiconductor azul-violeta disponible en el mercado. En una época en la que los descubrimientos se alumbran en equipos anónimos de empresas multinacionales, demostró que un inventor con talento y determinación podía triunfar, pese a tamaña desventaja.

Durante más de 25 años, los LED cubrían como un tercio del arco iris. Todo lo que se podía conseguir era rojo, naranja, amarillo y un verde amarillento. Los ingenieros querían el azul y el verde de verdad, porque con esos colores, junto con el rojo del que ya disponían, podían fabricar maravillas como el dispositivo emisor de luz blanca 12 veces más eficiente y de mayor duración que una bombilla ordinaria. No es sorprendente, por tanto, que se afirme que los LED están destinados a revolucionar la industria del alumbrado y a trascender su cometido habitual de luces indicadoras. Mientras tanto, los LED coloreados se están instalando ya en semáforos y en pantallas, la mayor de ellas la de Nasdaq en Times Square (Nueva York), de ocho pisos de altura. Y un láser semiconductor azul, similar a un LED, pronto cuadruplicará la capacidad de almacenamiento de los DVD y los CD, así como la resolución de las impresoras láser.



El camino hacia estos dispositivos optoelectrónicos se ha trazado, cosa admirable, en la isla de Shikoku, que es algo así como el patio trasero del Japón. Allí nació y creció Nakamura, y allí estudió también, en la Universidad de Tokushima. Obtuvo su título en 1979 y se colocó en Nichia, sobre todo porque estaba cerca, en Shikoku.

Empezó a trabajar en cristales de fosfuro de galio, que se utilizaban para fabricar LED de color rojo y verde amarillento. El presupuesto de investigación era magro. Nakamura tuvo que construirse él mismo todo el equipamiento básico; ello le obligó a aprender por sí solo labores tan singulares y delicadas como la soldadura del cuarzo.

En 1982 comenzó a producir cristales de fosfuro de galio cuya calidad en nada desmerecía los fabricados por las empresas de la competencia, las poderosas Sanyo, Sharp, Stanley Electric, Rohm y Toshiba. Pero los clientes se habían acostumbrado a éstas, dejándole a Nichia con las migajas del pastel de los LED. Durante los seis años siguientes, Nakamura sufrió las mismas frustraciones con los cristales de arseniuro de galio y, luego, con los LED completos, rojos e infrarrojos.

El departamento comercial de Nichia le echó la culpa a Nakamura de la escasez de ventas y más de uno pi-

dió su dimisión. “Me enfadé mucho”, recuerda. Pero en vez de dejarles que le echaran, decidió apuntar más alto. Sabía que el tesoro escondido de la optoelectrónica era un emisor de luz azul, y propuso entrar en liza.

El jefe de Nakamura, director de investigación y desarrollo, pensó que se había vuelto “loco”, y no lo aprobó. De manera que en enero de 1988 Nakamura se saltó el conducto reglamentario y entró directamente en la oficina del director de Nichia, Nobuo Ogawa, para pedirle 3,3 millones de dólares en fondos de investigación y un año libre para ir a la Universidad de Florida a estudiar una técnica de fabricación de semiconductores llamada deposición de vapor química metalorgánica (MOCVD), que consiste en soplar gases calientes sobre un sustrato para producir películas delgadas. La MOCVD estaba revelándose la técnica más apropiada para producir algunos semiconductores peculiares. Fue un lance atrevido para lo que es una empresa japonesa, que se rige mediante un sistema feudal, donde la veteranía se impone. Sin embargo, y para sorpresa de Nakamura, Ogawa aceptó sin más sus condiciones.

En el laboratorio de Florida se encontró con que lo que tenían era el material para montar un sistema de MOCVD. Y resultó que él era la única persona que podía hacerlo: sin doctorado ni una lista de publicaciones, “me trataron como ingeniero aplicado, no como investigador”. Construir el aparato de MOCVD le llevó 10 meses, trabajando siete días por semana, 16 horas al día.

De vuelta a Nichia en marzo de 1989 para trabajar en los dispositivos de luz azul, tuvo que escoger entre los dos principales tipos de semiconductores. No lo dudó: eligió el nitruro de galio, porque todos los gigantes de la industria y de la universidad estaban enfrascados con el seleniuro de cinc, y él se había cansado de seguir la batuta de los colosos, reacios al nitruro de galio porque uno de los preparados necesarios del material (el llamado tipo *p*) no se podía producir en cantidades comerciales.

Durante los 10 años siguientes, consiguió obtener más y más luz del nitruro de galio hasta eclipsar a sus competidores. Nakamura sumó una cadena de logros que, por genio y originalidad, no conoce hazaña superior en la historia de la investigación de semiconductores. Todo ha quedado reflejado en una relación de publicaciones imponente. Entre 1991 y 1996 figuró como autor o coautor de 146 artículos técnicos, seis libros y 10 capítulos de libros sobre semiconductores de nitruro de galio. La producción es más sorprendente si cabe porque fue elaborada a escondidas: Ogawa, el director, que temía que se divulgara el secreto, prohibió a los empleados de Nichia publicar o dar conferencias. En 1994 el trabajo que había realizado Nakamura era tan prodigioso, que la Universidad de Tokushima le concedió un doctorado en ingeniería.

La base del éxito de Nakamura fue un profundo conocimiento no sólo del crecimiento de cristales semiconductores, sino también —y ello reviste importancia mayor— de los aparatos para elaborarlos. La capa activa de su LED experimental, en la que los electrones y las vacantes de electrones —los huecos— se combinan para liberar fotones, era una película delgada de nitruro de galio e indio desarrollada sobre nitruro de galio. Los aparatos de MOCVD disponibles en el mercado no podían crear una película de nitruro de galio e indio suficientemente buena como para emitir una luz brillante, de modo que Nakamura comenzó a modificar su montaje. De sus años de construcción de reactores, hornos y aparatos de MOCVD, sabía cómo soldar cuarzo, lo que le permitía alterar rápidamente los conductos que portaban los reactivos extremadamente calientes del aparato de MOCVD.

Cada mañana Nakamura modificaba el reactor. Por la tarde, hacía crecer cuatro o cinco muestras. Tras un par de años, dio con la configuración que le iba a poner por delante de todos. En un sistema MOCVD común, los semiconductores se crean conforme los gases reactivos fluyen sobre un sustrato, paralelos a la superficie. En el sistema de Nakamura, un gas fluye paralelo a la superficie y el otro perpendicular a la misma. Esta configuración de “MOCVD de doble flujo” elimina las corrientes de convección térmica y enfría los gases reactivos, dando lugar a reacciones más estables y mejores películas.

En 1992 superó otro obstáculo para la fabricación industrial de LED con la invención de un proceso térmico para producir en masa nitruro de galio de tipo *p*. Para obtener un láser fiable necesitaba todavía la manera de minimizar los numerosos defectos en los cristales de nitruro de galio. A raíz de una conferencia que dieron unos investigadores de la NEC en 1997, Nakamura desarrolló una capa de dióxido de silicio estratégicamente situada dentro del cristal de nitruro de galio para bloquear algunos defectos. Hacia finales de año había incrementado la vida de sus láseres azules de semiconductor desde 300 horas hasta las 10.000 requeridas para un producto comercial.

A principios de 1999 Nichia comenzó a vender láseres azules de semiconductor de 5 miliwatt y —más tarde— láseres violetas con una longitud de onda de 405 nanómetros, la más corta nunca conseguida en un láser semiconductor. Nakamura también ha fabricado láseres azules de potencia superior a los 30 miliwatt. De cuánta exactamente, rehúsa decirlo (los niveles necesarios para las impresoras láser están entre los 50 y los 60 miliwatt).

En octubre del año pasado, tras haber hecho todo lo que quería con el nitruro de galio y cansado ya del sistema de investigación y desarrollo de la industria japonesa, que califica de “comunista”, decidió abandonar Nichia. Aunque sus inventos habían incrementado los beneficios anuales de Nichia desde menos de 100 millones de dólares hasta más de 400 millones, a Nakamura sólo le pagaban 100.000 dólares al año. Entre las 17 ofertas de empleo que recibió en el transcurso de cuatro semanas se contaba la de una compañía estadounidense que le ofrecía 500.000 dólares al año y opciones sobre acciones por valor de 10 millones de dólares. “A mí me resultaba increíble”, relata.

Estaba dispuesto a firmar el contrato, pero un profesor de una de las universidades que lo estaban cortejando le aclaró que, si aceptaba un empleo en la industria, Nichia —propietaria de las patentes sobre todas sus invenciones con el nitruro de galio— le pondría pleito a cuanto producto recordara su trabajo anterior. Tras ponderar el asunto, Nakamura aceptó una oferta de la Universidad de California en Santa Bárbara.

Con un prestigio labrado en el mundo de los semiconductores, Nakamura, a sus 46 años, sigue tan inquieto como siempre. Cuando le pregunto qué piensa hacer ahora, repone: “Aquí puedo poner en marcha una empresa privada; en cinco o 10 años, si logro inventar un nuevo dispositivo”. Y dice entre risas: “Quiero hacer realidad mi sueño americano”.

CIENCIA Y SOCIEDAD

Nobel 2000

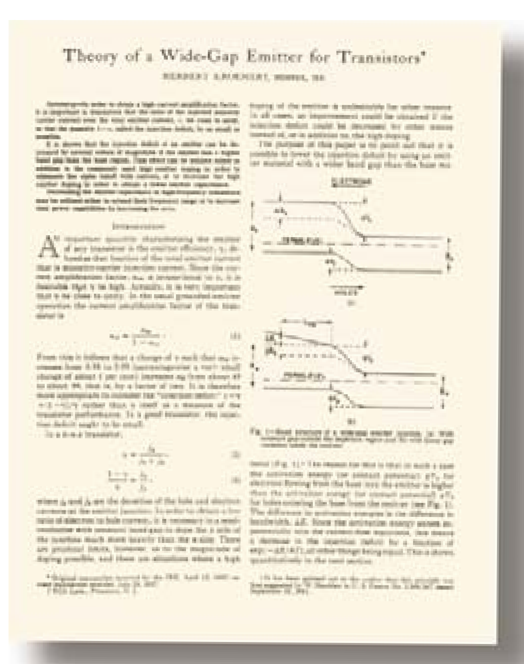
Física

La Real Academia Sueca de Ciencias ha dividido este año el premio Nobel de física en dos partes; una primera mitad se le concede a Zhores I. Alferov, del Instituto Físico Técnico de San Petersburgo, y Herbert Kroemer, de la Universidad de California en Santa Bárbara, “por el desarrollo de heteroestructuras semiconductoras aplicadas en electrónica de alta velocidad y en optoelectrónica”; la segunda mitad se le otorga a Jack S. Kilby “por su participación en la invención del circuito integrado”.

Según declara la Academia, el premio de este año reconoce la labor de los científicos que pusieron los cimientos de la técnica moderna de la información. Sin los transistores constituidos por estructuras compuestas de finas capas de materiales semiconductores, ideados por Alferov y Kroemer, no existirían ni estaciones de telefonía celular, ni diodos de láser en lectoras de códigos de barras, ni muchísimas aplicaciones más. Su trabajo abrió también el camino para poderosos diodos emisores de luz que emplean los frenos de los coches y los semáforos. Podían lograrse capas, el quid de la cuestión, dotadas de las propiedades electrónicas requeridas; las interacciones entre capas concedían a las heteroestructuras su ventaja sobre el silicio macizo. En particular, el acierto de Kroemer consistió en introducir materiales con pequeño intervalo de banda y dopaje selectivo, que permitían una regulación precisa y un transistor más veloz. Trabajaba en Radio Corporation of America cuando en 1957 publicó su trabajo nuclear sobre las propiedades de los heterotransistores, hoy galardonado. Pero no sólo los electrones, también se facilitaba el crecimiento de los fotones con leves modificaciones en las capas de espesor atómicas. Fue esa la aportación de Zhores I. Alferov en 1963.

Las contribuciones de Kilby a los circuitos integrados posibilitaron la instalación de procesadores en los ordenadores y en la mayoría de los ingenios electrónicos. Apenas terminada la segunda guerra mundial, se fabricó el primer computador, un armatoste elemental que resolvía las cuatro reglas con sus válvulas. Estas conmutaban más deprisa que los relés. Velocidad sería la palabra clave en los refinamientos ulteriores. El segundo principio, la miniaturización, no tardó en dominarse. Recuérdese que el ENIAC (Electronical Numerical Integrator and Computer), con la capacidad de una calculadora de bolsillo, ocupaba una habitación entera con su enorme carcasa. Pero la técnica de las válvulas llegó pronto a su límite. Con el descubrimiento del efecto transistor a finales de 1947, John Barden, Walter H. Brattain y William B. Schockley multiplicaron las posibilidades de conexión, amén del ahorro energético que comportaba y su indiscutible fiabilidad. Recibieron el Nobel en 1956.

El progreso de la electrónica en los años cincuenta demandaba la combinación de transistores, resistencias, diodos y condensadores. El tránsito de la visión teórica a la consecución de un circuito integrado lo dieron dos jóvenes ingenieros, Jack S. Kilby y Robert Noyce. El primero trabajaba en Texas Instruments y el segundo en Fairchil Electronics. (Noyce murió en 1990.) Kilby había pasado su infancia en Kansas, donde su padre trabajaba como ingeniero eléctrico; solía acompañarle en sus rondas de mantenimiento y éste le animó a construirse su propio equipo de radioaficionado para colaborar en la red de avisos de tornados u otras catástrofes. Terminada la fase de movilización en la segunda guerra, estudió ingeniería eléctrica en Illinois y Wisconsin. Ya en su primera empresa (Centralab) obtuvo una docena de patentes, sobre condensadores de titanato, empaquetamiento de transistores, un audífono transistorizado y otros. En 1958, decidido a profundizar en métodos de procesamiento numérico, entró en Texas Instruments. Al poco, durante las vacaciones de la empresa, se dedicó a su idea de crear circuitos monolíticos (integrados) en un sustrato de silicio con uniones P-N. (En 1959 logró un circuito integrado basculante de germanio. Otro hito de su habilidad ingenieril sería la aparición, en 1971, de la calculadora de bolsillo, el “pocketronic”, con un peso de 1,1 kilogramos y a un precio de unas 30.000 pesetas.)


Theory of a Wide-Gap Emitter for Transistors*

Primera página de uno de los artículos fundamentales de la teoría microelectrónica que ha sido galardonada con el Nobel de física de este año

Química

Tres especialistas en macromoléculas —Alan J. Heeger, de la Universidad de California en Santa Bárbara, Alan G. MacDiarmid, de la Universidad de Pennsylvania, y Hideki Shirakawa, de la Universidad de Tsukuba— han merecido el reconocimiento Nobel “por el descubrimiento y desarrollo de polímeros conductores”. Se repartirán ex aequo los nueve millones de coronas suecas que acompañan al diploma. La investigación que les llevó a la posibilidad de modificar los plásticos para que vehicularan corriente eléctrica se remonta a finales de los años setenta. Se ha generalizado ya su uso en substancias antiestáticas en películas fotográficas, protecciones de pantallas de ordenador frente a la radiación electromagnética y otros. Los polímeros semiconductores se aplican

en diodos emisores de luz, células solares y pantallas de teléfonos celulares.

Porque los plásticos no conducen la corriente, hemos aprendido, sirven para revestir y aislar los cables. Los plásticos son polímeros, cadenas largas de moléculas, donde, a diferencia de los metales, los electrones no se mueven con facilidad. En eso estriba su condición aislante. Pero cabía una pequeña cuña en ese marco teórico. Bajo la denominación de plásticos caen también pares conjugados de uniones, en los que a una unión simple le sigue una unión doble entre sus átomos de carbono; en cuyo caso pueden extraerse electrones por oxidación o introducirse por reducción. Los electrones extra o sus correspondientes huecos pueden fluir entonces por la molécula dopada, posibilitando que el plástico conduzca la electricidad casi como un metal.

El descubrimiento del segundo tipo de polímeros fue puro azar, en cuyo desarrollo intervino como actor principal el poliacetileno, un polímero sencillo que se presenta en la forma *cis* y *trans*. Ocurría a principios de los setenta. En el laboratorio de Hideki Shirakawa, un alumno confundió las concentraciones de los reactivos y añadió una cantidad de catalizador mil veces superior a la requerida. En las paredes del matraz apareció una película de *trans*-poliacetileno, plateado. A otra temperatura, obtuvo una película de *cis*-acetileno, cobrizo.

En 1976 Alan G. MacDiarmid participaba en una reunión celebrada en Tokyo y allí se enteró del descubrimiento de Shirakawa. Decidieron proseguir conjuntamente en esa línea de investigación. Del estudio óptico se ocuparía Alan J. Heeger. Con sorpresa descubrieron que el *trans*-poliacetileno, dopado con yodo, conducía la electricidad diez millones de veces más que un plástico común. De esa colaboración salió el artículo fundamental: "Synthesis of electrically conducting organic polymers: Halogen derivates of polyacetylen (CH)n", publicado en 1977 en el *Journal of Chemical Society*.

Medicina y Fisiología

Arvid Carlsson, Paul Greengard y Eric Kandel han recibido el Nobel en ese apartado por sus descubrimientos en el campo de la "transducción de señales en el sistema nervioso". ¿Qué mecanismos fisiológicos subyacen bajo el pensamiento y la memoria? Desde la antigüedad el hombre se ha planteado su desciframiento, cuyo secreto debía esconderse en el cerebro. El sueco Carlsson y el norteamericano Greengard se centraron en los neurotransmisores y mecanismos de operación para descubrir la comunicación entre neuronas. Que su asociación se modificaba a través del proceso de aprendizaje y construían así memorias a largo plazo lo había puesto de relieve Kandel en sus trabajos con organismos sencillos. Greengard, que investiga en el laboratorio de ciencia molecular y celular de la Universidad Rockfeller en Nueva York, descubrió el mecanismo en cuya virtud la dopamina y otros transmisores actúan en el sistema nervioso. Kandel, cuyo laboratorio se halla en el centro de neurobiología y comportamiento de la Universidad de Columbia, investigó la base molecular del aprendizaje y la memoria usando un caracol marino, la *Aplysia* como animal de experimentación. Carlsson, del departamento de farmacología de la Universidad de Gothenburg, descubrió que la dopamina era un transmisor cerebral y que su ausencia provoca la enfermedad de Parkinson. Considerados en su conjunto e interrelacionados, tales descubrimientos han llevado al desarrollo de nuevos medicamentos para tratar las enfermedades nerviosas y psicóticas.

Aloja nuestro cerebro más de 100 millardos de neuronas que interaccionan entre sí de múltiples y enrevesadas maneras. Unas reciben y elaboran señales, que a su vez envían a otras neuronas. Encargados de vehicular tales mensajes son los neurotransmisores.

En una serie de experimentos, desarrollados en los años cincuenta, Carlsson mostró que la dopamina se concentraba en zonas del cerebro involucradas en el control del movimiento. Advirtió que la reserpina, un alcaloide natural empleado en la terapia de la esquizofrenia, vaciaba los niveles de dopamina en las neuronas presinápticas. Los conejos tratados con reserpina se tornaban incapaces de realizar movimientos voluntarios, pero se recuperaban si les administraba L-DOPA, un precursor de la dopamina. Aquellos conejos "congelados" recordaban a los enfermos de Parkinson. Pocos años después se introdujo la L-DOPA en clínica. Carlsson observó también que las medicinas recetadas contra la esquizofrenia bloqueaban los receptores de dopamina en la superficie de las neuronas postsinápticas. En resumen, su obra ha puesto de relieve el papel crucial de la concentración cerebral idónea de la dopamina: su exceso produce enfermedades psicóticas, su defecto, alteraciones motoras.

Greengard comenzó a abordar en los años sesenta qué sucedía una vez que la dopamina se enlazaba con sus receptores postsinápticos. De algunas hormonas se sabía que su unión al receptor intensificaba la concentración de AMP cíclico. Este segundo mensajero activaba las quinasas, enzimas que agregan grupos fosfato a diversas proteínas y modifican, con ello, su función. Andando el tiempo, demostró que la dopamina y otros neurotransmisores provocaban una compleja cascada de episodios de fosforilación y defosforilación. Descubrió en particular que la proteína DARPP-32 desempeñaba un papel fundamental en la

Microsistemas de neuronas

Constituyen las unidades elementales de la función mental. Los estudios sobre especies animales de la simplicidad del caracol Aplysia muestran que ciertos microsistemas de neuronas dan cuenta de formas de aprendizaje y memoria

Eric R. Kandel

Kandel ha demostrado que los cambios en el rendimiento sináptico modifican la conducta. La ilustración recoge la primera página de una de sus colaboraciones en Investigación y Ciencia

regulación de los estados de fosforilación de muchas de las proteínas que participan en la vía de señalización de la dopamina.

Kandel se centró en los procesos celulares del aprendizaje y la memoria. Su inicial modelo experimental, la *Aplysia*, no tiene mucho que recordar, pero sí posee un reflejo para proteger sus branquias. Halló que algunos estímulos amplificaban este reflejo durante días o semanas, aprendizaje que comportaba un aumento de la liberación de neurotransmisores en las sinapsis que conectan las células nerviosas sensoriales con las que activan los músculos implicados en el reflejo. Elevación que viene mediada por un mecanismo de fosforilación de la proteína parecido a los estudiados por Greengard. Tras aclarar la base celular de la memoria a corto y a largo plazo de *Aplysia*, Kandel extendió sus trabajos a los mamíferos. Preparó, además, el escenario para estudiar la potenciación a largo plazo y demostró que los cambios en el rendimiento sináptico podían conducir a cambios en la conducta.

Calabaza

Domesticación

Por la domesticación las plantas se adaptan al cultivo, entran en la dieta del hombre o pasan a formar parte de sus actividades cotidianas en medicina, rituales y materia prima para la elaboración de útiles. Se domestican las especies que procuran algún bien y cuentan con potencial de aumento de productividad. Ello redunda en un cambio genético, resultante de una selección de características deseables.

La calabaza (*Cucurbita pepo* L.), de la familia de las Cucurbitaceae, fue, con el maíz y el fríjol, una de las primeras plantas domesticadas en Mesoamérica. Dicho proceso señala el inicio de la transición de la actividad cazadora-recolectora a la agricultura.

Igual que otras plantas, *C. pepo* ha estado sometida a lo largo de su historia a una combinación de procesos naturales, además de intereses culturales de selección, que han influido en una serie de cambios que tienen que ver con el tamaño de los frutos, el color y sabor de su pulpa, la cantidad y tamaño de las semillas, así como también la adaptación de su cultivo a condiciones diversas.

Siendo la calabaza una fuente importante de alimentación desde épocas remotas, el estudio sobre su historia se ha visto favorecido en los últimos años, debido al resurgir de la etnobotánica, que, apoyada en el registro arqueológico, ha permitido ampliar el conocimiento acerca del origen y domesticación de esta especie.

La conservación de restos arqueológicos de calabaza no siempre es óptima. Con frecuencia sólo se encuentran pequeños fragmentos de semillas, de corteza del fruto (pericarpo) o bien de pedúnculos (punto de unión del tallo con el fruto), que, en muchos casos, son restos carbonizados. Sin embargo, en México han aparecido diversos elementos en buen estado de conservación. La información arqueológica más antigua relacionada con *Cucurbita pepo* proviene de las cuevas de Ocampo en Tamaulipas, Tehuacán en Puebla y Guila Naquitz en Oaxaca.

Las primeras dataciones por radiocarbono (C^{14}), operadas con material asociado a estos restos, arrojaron una antigüedad de 8750 a.C.-700 d.C. Más recientemente, en 1997, Bruce Smith realizó dataciones directas de pequeñas muestras mediante un espectrómetro acelerador de partículas (AMS, por sus siglas en inglés) y confirmó la edad de 10.000 años como el registro más antiguo para una semilla de *C. pepo*, proveniente de la cueva de Guila Naquitz. De acuerdo con sus características morfométricas, esa pepita procede de una planta que ya era cultivada en aquella época, tomando como base las características morfológicas de materiales de comparación de colecciones de especies silvestres y cultivadas de la actualidad.

Entre los caracteres que se consideran diagnósticos para considerar domesticada a una calabaza se mencionan el grosor y estructura celular de su pericarpio, el diámetro basal y morfología general del pedúnculo, así como las dimensiones y características del margen de las semillas.

Por su morfometría, características bioquímicas y genéticas, los parientes más cercanos a *Cucurbita pepo* son dos especies silvestres: *C. fraterna* L. H. Bailey, conocida del noreste de México, y *C. texana* (Scheele) A. Gray, endémica del sudeste de los Estados Unidos. Tiene la segunda mayor afinidad con los tipos de calabazas que se cultivan en Norteamérica. Se han propuesto, en consecuencia, dos centros independientes de domesticación, uno en el este de los Estados Unidos y el otro en el NE de México.

Según parece, *Cucurbita pepo* está constituida por tres subespecies: la subespecie *pepo*, que incluye a todos los tipos cultivados comestibles



La calabaza (Cucurbita pepo) *lleva cultivándose desde hace 10.000 años por lo menos*

y ornamentales, y las subespecies *texana* y *fraterna*, correspondientes a los ancestros silvestres del grupo.

La variación de *C. pepo*, muy amplia, no se limita a cultivares comerciales y razas o variedades locales comestibles con características morfológicas y fenológicas diversas. A tenor de esta diversidad y en ocasiones teniendo en cuenta los tipos de usos culinarios a los que se destinan estos cultivares, se han propuesto, sin mucho éxito, sistemas de clasificación que intentan reflejar su origen y posible evolución.

De México a Centroamérica encontramos la especie en zonas muy dispares. Algunas variantes se cultivan por arriba de los 2000 metros de altitud y otras pueden crecer sin problemas en campos cercanos al nivel del mar y en condiciones ecológicas limitantes.

C. pepo es probablemente la especie cultivada que más tempranamente y con mayor amplitud se difundió fuera del continente americano. Nos lo demuestran las numerosas pinturas de sus frutos realizadas por artistas europeos de los siglos XVI y XVII. Desde esa época se sabe que se consumía en varios países de Europa, Asia, Oceanía y Africa.

En Iberoamérica, su cultivo es un elemento común y parte fundamental de la agricultura tradicional de subsistencia. Se siembra en los sistemas de policultivo conocidos en México y Centroamérica como "milpas", en donde es habitual la asociación de una o más especies de calabaza con el maíz, el fríjol y hortalizas. No obstante, las calabazas también pueden encontrarse cultivadas de manera individual. A diferencia de lo que acontece en los campos tradicionales, las plantaciones comerciales se ubican en sitios con condiciones ecológicas más favorables, donde se emplea el riego para el crecimiento de las plantas; en éstas, además, la diversidad manejada es menor y la producción, mucho más estable y predecible.

La historia de *Cucurbita pepo* aún no está concluida. Se cuenta con una fecha de 10.000 años de antigüedad para una calabaza ya cultivada. Pero se ignora lo sucedido con anterioridad y en los 5000 años posteriores. Para llegar a conocer un poco más de la historia de esta planta, se requieren hallazgos arqueológicos que brinden restos orgánicos en buen estado de conservación. En México, un grupo de arqueobotánicos en colaboración con arqueólogos, se han dado a la tarea de continuar buscando este tipo de pruebas.

JOSÉ LUIS ALVARADO
FERNANDO SÁNCHEZ MARTÍNEZ
Laboratorio de Paleobotánica.
Inst. Nac. Antropología e Historia,
México

RAFAEL LIRA SAADE
Laboratorio de Recursos Naturales,
Unidad de Biotecnología
y Prototipos. UNAM, México.

El lenguaje de los sordos

La obra de Hervás y Panduro

Durante siglos las personas sordomudas han sido consideradas como disminuidas y privadas de las capacidades mentales que poseen las personas que hablan y oyen. Viejo prejuicio que empezó a cambiar gracias al esfuerzo de algunos religiosos españoles, que desde el siglo XVI se empeñaron en enseñar el idioma vocal a los sordomudos. El primero de ellos fue el benedictino Pedro Ponce de León, quien, en esa centuria, enseñó a hablar y a leer a varios sordos del monasterio de Oña. Inventó un alfabeto manual que permitía a los sordomudos deletrear los sonidos con los dedos.

Los métodos de Ponce de León y la continuidad que tuvo su obra en Juan Pablo Bonet, Ramírez de Carrión y otros constituyen el núcleo de lo que Lorenzo Hervás (1735-1809) llamó "escuela española de sordomudos". Los logros de esta escuela acabaron inspirando los métodos pedagógicos de la enseñanza para sordomudos de ingleses, franceses y alemanes.

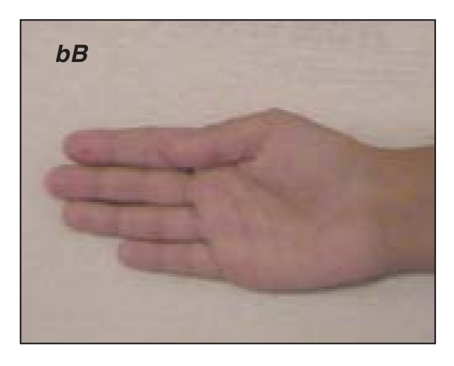
En 1795, Hervás publica en Madrid su obra en dos volúmenes *Escuela española de sordomudos*, donde se propone un doble objetivo. El primero es situar en su justo lugar la obra de los españoles que inventaron y desarrollaron los métodos para la educación de los sordomudos, asentando inequívocamente que aquéllos tienen su origen en España. El segundo objetivo, que distingue a Hervás como adelantado a la moderna lingüística de signos es la demostración de que el lenguaje de signos de los sordomudos es un lenguaje humano entre otros, como el español, el ruso o el chino.

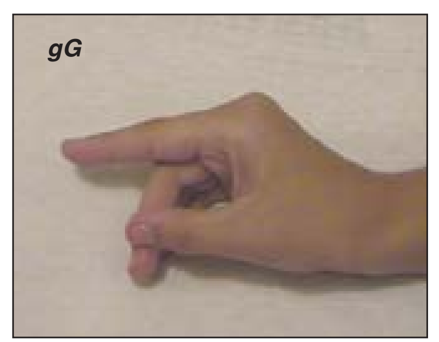
Para llevar a cabo la demostración de que el lenguaje de signos y el lenguaje verbal son equivalentes, Hervás aprovecha sus conocimientos de las lenguas del mundo. Hervás empezaba a ser conocido en Europa como el autor de una obra enciclopédica publicada en Italia llamada *Idea dell'universo*, en 21 tomos. Los cinco últimos tomos de esta enciclopedia se ocupan principalmente de la clasificación de las lenguas del mundo, de su estructura, y de su diversidad.

Empleó para la clasificación de las lenguas un criterio comparativo, que fue el preludio al método comparativo forjado unos años más tarde por Grimm, Bopp y Schleicher, el cual dio origen a la lingüística científica. Max Müller, en sus *Lectures on the Science of Language*, de 1861, afirmó que Hervás fue el primero en señalar que la afinidad entre lenguas tiene que ser determinada por la estructura gramatical y no por el mero parecido entre las palabras.

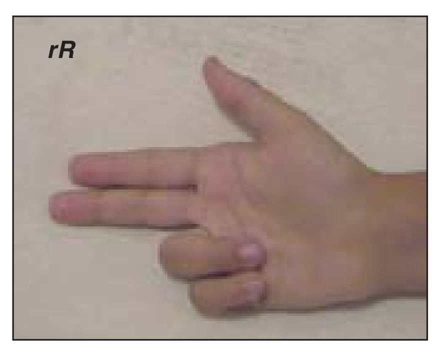
Cuando hubo concluido su enciclopedia en 1787, Hervás puso su atención en la educación de los sordomudos. En su aportación científica más original afirma que los sordomudos tienen ideas gramaticales. Entiende por ideas gramaticales las categorías gramaticales como nombre y verbo. Estas ideas las tienen los sordos como representaciones mentales, y ello es lo que constituye la gramática de los sordomudos. Esta, prosigue Hervás, es totalmente mental. Se coloca así en la avanzadilla del mentalismo lingüístico, que es hoy la actitud dominante en la lingüística teórica.

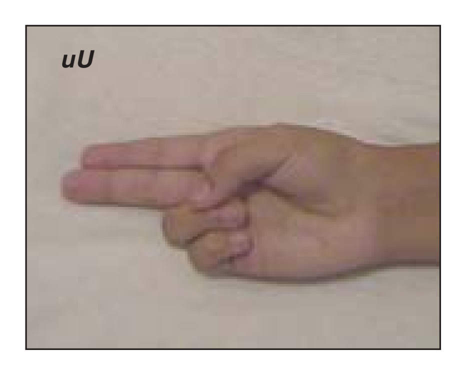
Pero lo más sorprendente es el camino que conduce a Hervás a la afirmación de que el lenguaje de signos de los sordos (LS) es una forma entre otras del lenguaje humano. Este camino es el de la comparación transidiomática de las lenguas existentes con el lenguaje de signos, comparación que lleva a cabo en su *Escuela española de sordomudos*. En ella ofrece argumentos empíricos para demostrar la equivalencia entre un LS y un lenguaje verbal (LV). Es cierto, dice el jesuita, que los LV como el español y el alemán tienen nombres que manifiestan el género gramatical (masculino, femenino, neutro) y el caso (nominativo, acusativo, dativo), mientras que un LS carece de marcas de género y caso. Esta carencia, arguye, no rebaja a un LS, pues hay LV donde no existe diferencia de género gramatical, como el inglés. Los casos gramaticales, una categoría fun-

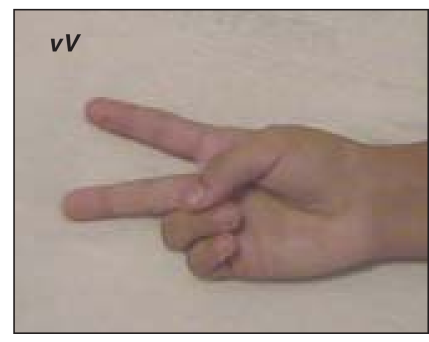












Alfabeto manual empleado por Hervás

damental en los LV, son la expresión de la relación que tiene el verbo con sus argumentos (el agente y el paciente). En un LS los casos se expresan mediante el orden en que se producen los signos manuales: primero el agente, después el verbo, y a continuación el paciente.

El artículo (*el, la, un, una)* es otra categoría que aparece en los LV, en particular en las lenguas europeas. Hervás observa en Roma un LS que carece de artículo. Esta carencia, dice, tampoco disminuye al LS. Muchos idiomas carecen de artículo.

El verbo *ser*, que tiene un papel fundamental en el desarrollo de la filosofía occidental, está ausente en el LS que observa Hervás. Pero la naturaleza de los idiomas tampoco pide algún verbo sustantivo. Falta este verbo en casi todas las lenguas de la familia americana.

En fin, otras categorías de los LV europeos, apunta Hervás, como la voz pasiva, faltan en los LS. El estudio transidiomático revela que la voz pasiva falta en chino y groenlandés.

No se puede afirmar, concluye, que un LS sea inferior a un LV. Uno y otro son formas equivalentes del lenguaje humano. Esta idea es hoy aceptada por lingüistas, psicólogos y pedagogos. Hervás llega a esta conclusión por el análisis transidiomático. Hay, además, una causa de la que procede esa equivalencia de lenguas: tanto el LV como el LS están presentes en un organismo que posee mente o representaciones mentales que albergan las ideas gramaticales; esta forma de albergar en la mente ideas gramaticales constituye ya un saber lingüístico; o expresado en términos de la lingüística contemporánea, oyentes y sordomudos disponen de una competencia gramatical.

Pues el lenguaje humano, dice Hervás, no se define sólo por estar constituido por símbolos arbitrarios, sino por ser la declaración exterior de los actos mentales. Si sólo fuera el carácter simbólico lo que define al lenguaje humano, los pájaros que cantan podrían tener lenguaje. Si no lo tienen, afirma el jesuita, es porque los pájaros no tienen mente.

La comparación transidiomática y la observación del LS llevan a Hervás a la afirmación de que el lenguaje muestra en su estructura (o su “artificio”) una variedad y complejidad extraordinarias. Por eso, concluye, las lenguas no pueden ser invención humana. El LS es natural al hombre, mientras que el LV no es resultado de una convención artificial. Por tanto, una y otra forma de lenguaje le vienen dadas al hombre.

La suerte que tuvieron las ideas de Hervás sobre el lenguaje de signos fue adversa. Fueron olvidadas en España y desconocidas en Europa. Pero hoy debemos reconocer que se adelantó en casi dos siglos a la moderna lingüística de los signos manuales, que ha demostrado la equivalencia del lenguaje signado y el lenguaje verbal de los que oyen.

ANGEL ALONSO-CORTÉS
Universidad Complutense
Madrid

Cambio climático

Función tampón de los bosques

Las plantas de los ecosistemas terrestres, además de ser una fuente básica de alimentos, madera, fibra y energía, protegen los suelos de la erosión; con su capacidad asimiladora de residuos, limpian cursos de agua contaminados. Los propios ecosistemas son componentes importantísimos en los ciclos del carbono, nutrientes y agua. Los cambios en el clima y en la composición química de la atmósfera pueden alterar la estructura, función y productividad de los ecosistemas terrestres, y a la inversa.

El consumo de energía que proviene de combustibles fósiles, como carbón, petróleo o gas natural, nos proporciona bienestar, pero se ha convertido en un problema para el entorno. El aumento de dióxido de carbono (CO_2) en la atmósfera constituye un ejemplo paradigmático. La concentración de CO_2 en la atmósfera se mantuvo constante durante los últimos milenios hasta el siglo XVIII. Desde la revolución industrial, su ni-

vel ha aumentado en más de un 30 % y se presume que llegará a doblar la concentración preindustrial alrededor del año 2050.

Las causas principales del aumento de CO_2 en la atmósfera son: el uso de combustibles fósiles, responsable de la emisión de unos 5500 millones de toneladas de carbono por año, y la deforestación, que comporta la emisión de unos 1600 millones de toneladas de carbono por año. La mitad de estas emisiones se quedan en la atmósfera; la otra mitad se disuelve en los océanos o es asimilada por la vegetación.

Las plantas asimilan unos 2100 millones de toneladas por año de este carbono, pero sólo retienen unos 1600 millones de toneladas en la biomasa. Dicho de otro modo, una cuarta parte del CO_2 emitido por la actividad industrial permanece 'secuestrado' por los ecosistemas terrestres. ¿Podemos, pues, utilizar la vegetación, y en particular los bosques, para reducir el aumento atmosférico de CO_2 y frenar el cambio climático?

Además de nutrientes y agua, las plantas requieren para su sustento y funciones metabólicas CO_2 del aire, que incorporan a través del proceso de fotosíntesis. Así, al aumentar el CO_2 atmosférico, también crece la disponibilidad de CO_2 para las plantas.

Para conocer si los ecosistemas pueden secuestrar el exceso de CO_2 emitido, necesitamos averiguar la producción neta del ecosistema en cuestión. El aumento de CO_2 en la atmósfera fomenta la producción primaria de un bosque porque estimula la fotosíntesis. Ahora bien, el incremento de temperatura asociado al cambio climático podría comportar un aumento de la respiración del sistema (plantas y suelo). El balance entre estos dos procesos (fotosíntesis y respiración) determinará si la producción neta del ecosistema es positiva o negativa, es decir, si en el futuro, los ecosistemas serán lugares de almacenamiento de carbono o, por el contrario, productores de CO_2.

Los bosques son los ecosistemas que encierran el mayor potencial para secuestrar el exceso de CO_2 atmosférico. Contienen el 80 % del carbono total almacenado en la vegetación del planeta y ocupan una tercera parte de la superficie continental.

Según un trabajo publicado en *Science* en mayo de 1999, el crecimiento de un bosque de pinos aumentó en un 25 % durante los dos años en que se le expuso a la concentración atmosférica de CO_2 predicha para el año 2050. En ese artículo, una colaboración internacional en la que participaron los autores, se indicaba que si todos los bosques que existen en la actualidad crecieran un 25 % más rápido en los próximos 50 años, los bosques absorberían hasta el 50 % de las emisiones de CO_2 futuras debido al uso de combustibles fósiles y la desforestación. Cierto es que el bosque estudiado está compuesto por pinos relativamente jóvenes que tienen una tasa de crecimiento alta. Bosques maduros o compuestos de especies de crecimiento más lento absorberían menos carbono del predicho por este estudio.

Pero eso no minimiza el interés de las áreas forestales en su relación directa con el clima del planeta. La transformación de zonas forestales en urbanas merma el potencial de los bosques para secuestrar el exceso de CO_2 emitido. No sólo desaparecen estos captores activos del gas, sino que, además, el carbono que estaba almacenado en la biomasa de los árboles retorna a la atmósfera una vez que la madera convertida en papel o cajas de cartón acaban incinerándose.

¿Pueden los bosques capturar y retener el exceso de CO_2 y ser capaces de evitar el cambio climático? En el mejor de los casos los bosques absorberían "sólo" la mitad de las emisiones de CO_2. El otro 50 % persistiría todavía en la atmósfera y sería el responsable del cambio climático.



Foto aérea del proyecto FACE (Free-Air CO_2 enrichment) en el Duke Forest, Durham. La estructura del experimento se apuntalaba en siete anillos de 30 m de diámetro, rodeados por cañerías de PVC que emanan aire enriquecido con CO_2. Los árboles (Pinus taeda) *en el interior del anillo viven en un entorno atmosférico propio del año 2050. (Cortesía de Will Owens)*

Limitar las emisiones de CO_2 y otros gases invernadero parece ser la única solución segura para evitar el cambio del clima y sus consecuencias.

ROSER MATAMALA
Dpto. de Ciencias Ambientales
Laboratorio Nacional de Argonne, EE.UU.
MIQUEL ANGEL GONZÁLEZ-MELER
Dpto. de Ciencias Biológicas,
Univ. de Illinois en Chicago

Malformaciones

En los coleópteros

Los organismos sufren a menudo malformaciones que afectan a su arquitectura corporal. Los insectos no son una excepción. Puesto que el grupo entomológico más rico en especies es el orden de los Coleoptera, nada tiene de extraño que en él se concentren la mayoría de las teratosis.

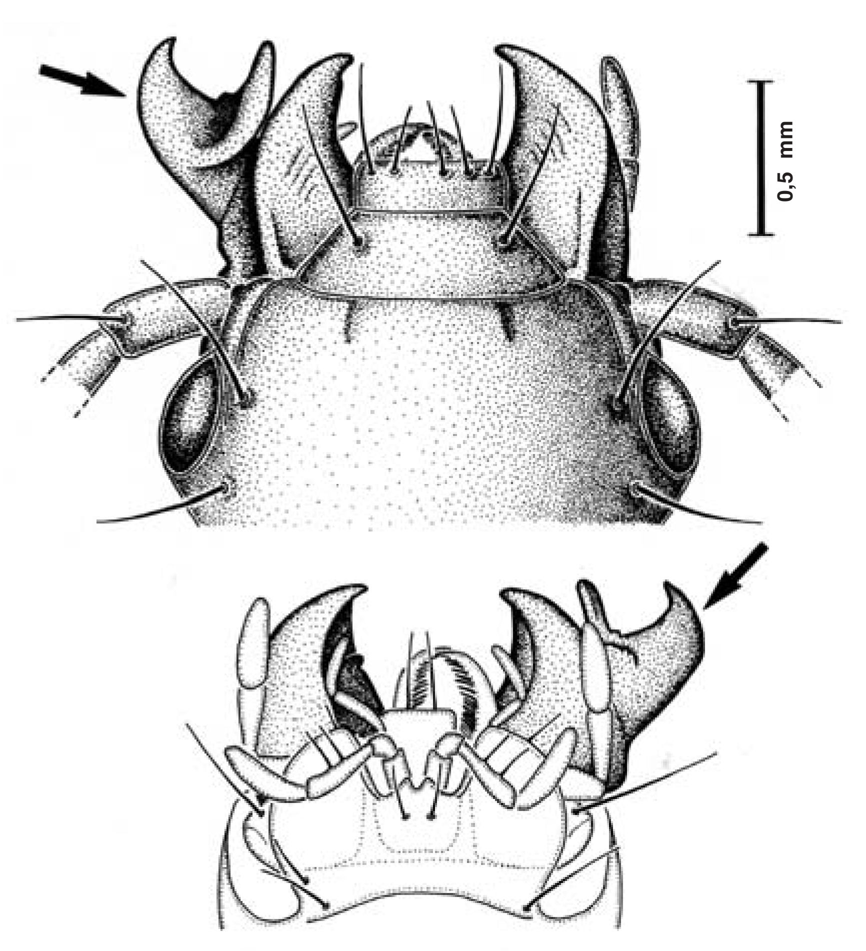
En 1948 Jean Balazuc dividió las malformaciones en cuatro grandes grupos: anomalías generales (gigantismo, enanismo, entre otros), corporales (que afectan a alguno de los tres tagmas), de los apéndices (cefálicos y marchadores), y por último, de los élitros y de las alas.

De las anomalías generales las más interesantes conciernen a los individuos ginandromorfos de especies con un acusado dimorfismo sexual.

Las anomalías en los tagmas pueden afectar a la segmentación por fusión de dos o más segmentos, por desaparición de una parte de los segmentos (hemiatrofias), por bipartición de regiones corporales y por aparición de tumoraciones.

Las anomalías en los apéndices, las más frecuentes, destacan también por su mayor heterogeneidad. Con el nombre de polimelias se designa la aparición de apéndices o segmentos supernumerarios; las meiomelias nos remiten a la desaparición o fusión, total o parcial, de apéndices; las ectopias aluden al desplazamiento o situación anormal del apéndice, y, las heteromorfosis, a la producción de un determinado apéndice que ocupa el lugar de otro, de diferente naturaleza histológica.

Por último, las anomalías de los élitros y alas reúnen fenómenos de duplicación, atrofias, desaparición, tumoraciones, perforaciones y diversas malformaciones en el desarrollo de la venación alar y estriación de los élitros.



Cabeza en visión dorsal y ventral de Haptoderus amaroides (Coleoptera: Carabidae) *que manifiesta la mandíbula izquierda trirramia. Esta anomalía se ubica entre las polimelias y se define como esquistomelia ternaria heterodinámica. Resulta muy poco frecuente este tipo de teratosis mandibular, causada por pequeñas mutaciones*

La investigación ha permitido trascender la clasificación anatómica y ahondar en el origen de las malformaciones, en su etiología. Las teratosis surgen por mutaciones, anomalías durante el desarrollo embrionario, formación de huevos compuestos y agentes exógenos (mecánicos, físicos, químicos y parasitarios).

De las malformaciones mutagénicas revisten particular interés las que muestran simetría bilateral. Hace años descubrimos un caso muy espectacular de sinfisomelia múltiple en *Steropus globosus*, un carábido. Las seis patas mostraban el mismo tipo de teratosis, fusión parcial de los tres tarsómeros basales acompañados de la aparición de caracteres tibiales. A esta nueva estructura presente en cada pata del insecto se le llamó “tarsotibia” por su posición anatómica y su peculiar forma. Los procesos de hibridación favorecen otras teratosis de origen mutágeno.

Para ilustrar las malformaciones debidas a anomalías durante el desarrollo embrionario nos sirve el fenómeno de inversión de órganos. Tamaña aberración se hace patente cuando se produce sobre una estructura asimétrica, verbigracia, los órganos copuladores de algunos coleópteros.

Los huevos compuestos propician la aparición de imagos y estados preimaginales dobles (o múltiples). En los coleópteros estas anomalías suelen ser inviables. Pero los himenópteros sociales (hormigas, avispas y abejas) facilitan, con sus cuidados parentales, que progresen individuos dobles (múltiples), al menos durante las primeras fases del desarrollo. Lo comprobamos en una prepupa doble de *Leptothorax fuentei*.

Los agentes exógenos multiplican la cifra de casos teratológicos. Agentes mecánicos bióticos y abióticos producen amputaciones que evolucionan hacia teratosis por tumoración o regeneración incompleta o anómala. El calor y la humedad, entre otros, son,

asimismo, responsables de atrofias relacionadas con las alas y los élitros. De todos es conocido el poder teratógeno de muchos agentes químicos, circunstancia que ha ido en aumento con el uso y abuso de herbicidas e insecticidas. Sin olvidar que ciertos tipos de relaciones parasitarias comportan importantes cambios anatómicos y morfológicos en el hospedador.

Si bien el diseño corporal varía ampliamente, la arquitectura molecular suele ser más constante. Los genes que especifican las regiones corporales en vertebrados e invertebrados están estrechamente emparentados. Por ello, el estudio de los casos teratológicos en insectos cobra una nueva dimensión, al poder inducirse en laboratorio ciertas teratosis, que nos han de llevar a un mejor conocimiento del origen de la tagmosis o "regionalización" del cuerpo, humano incluido.

VICENTE M. ORTUÑO
Departamento de Biología Animal
Universidad de Alcalá de Henares
Madrid

Conservación de alimentos

Atmósferas modificadas

En los últimos años se vienen desarrollando técnicas de envasado de alimentos en películas de material plástico transparente. Los envases contienen medios que, en contacto con el alimento, inhiben todas las formas vivas de crecimiento; pero pueden también inducir cambios fisicoquímicos que originen alteraciones en las propiedades sensoriales del producto comercial.

Entre las técnicas empleadas se citan el envasado a vacío, inclusión en el envase de productos secuestradores de oxígeno, generadores de vapor de etanol, y envasado con monóxido de azufre, óxido nitroso y dióxido de carbono.

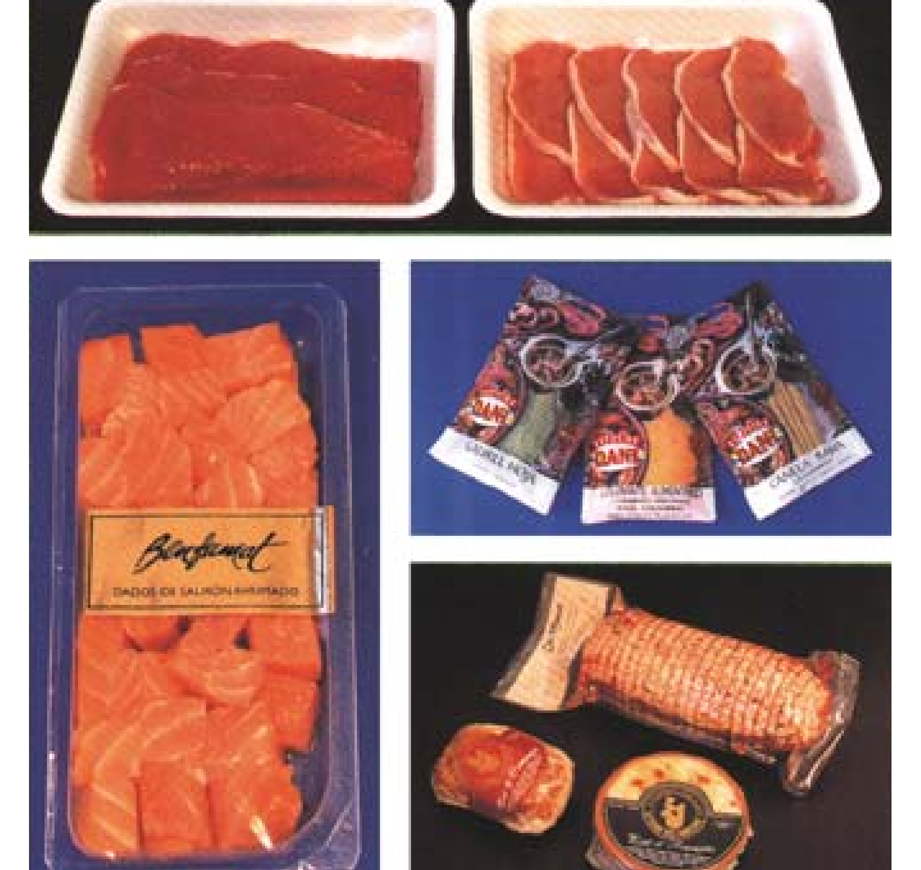
La técnica de envasado en atmósferas modificadas (EAM) define el procedimiento que, en condiciones normales de presión y temperatura, no debe reaccionar ni ejercer ninguna acción química de alteración a los alimentos que protege. Su aplicación en recipiente cerrado exige la evacuación del aire y el llenado con una mezcla de gases en una composición estudiada, de tal forma que se estabilice mejor la acción de cada gas y, como consecuencia, el efecto de la mezcla sea apropiado para el mantenimiento del producto.

El método EAM inhibe efectos de la alteración y mantiene una alta calidad en los alimentos perecederos durante su vida comercial o extiende la vida útil. Las mezclas de gases utilizadas son diferentes para cada alimento, de acuerdo con el tipo de producto a envasar, contenido y diversidad de ingredientes, condiciones de almacenamiento y vida útil esperada. En 1986 Hitlian describió dicha técnica como el envasado de un producto perecedero en una atmósfera modificada, siendo su composición distinta de la del aire.

La técnica del envasado en atmósferas modificadas para incrementar la vida útil no constituía ninguna novedad en la conservación de alimentos. Desde hace tiempo se sabía que el almacenamiento de alimentos en atmósferas de composición diferente de la del aire podía alargar su vida comercial. Los químicos del siglo XIX conocían la acción preservativa ejercida por el dióxido de carbono sobre los alimentos.

Sin embargo, la investigación básica no consideró el empleo de las atmósferas modificadas para prolongar la vida útil de la fruta, carne y pescado hasta los años veinte de la centuria siguiente. Apenas si traspasó las paredes del laboratorio. En los años setenta comenzó a aplicarse con éxito en la comercialización de carnes, frutas, legumbres y productos de panadería y, más recientemente, en pescados.

La conservación de alimentos refrigerados por este sistema alarga su vida comercial cuando se utilizan mezclas apropiadas de gases durante el almacenamiento. Esto, unido a un creciente interés del consumidor por adquirir alimentos frescos, convierte a la técnica en muy atractiva desde el punto de vista económico, ya que posibilita su distribución en mercados situados a larga distancia. Se ofrece además un producto de mayor estabilidad y buen estado de calidad, al mejorar su aspecto y las condiciones sanitarias del alimento.

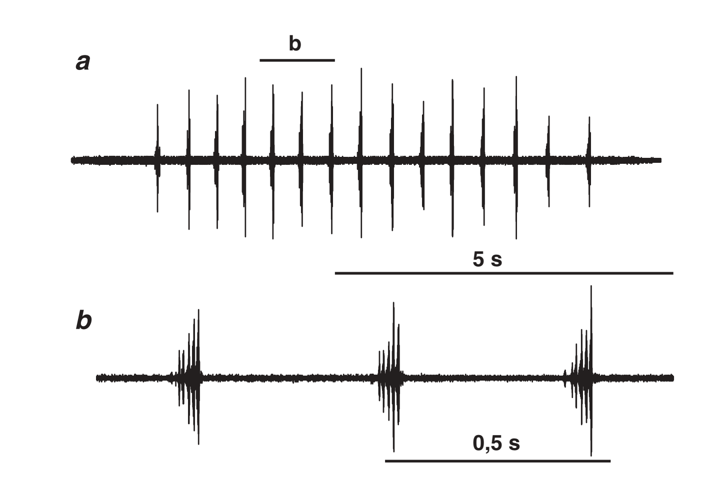


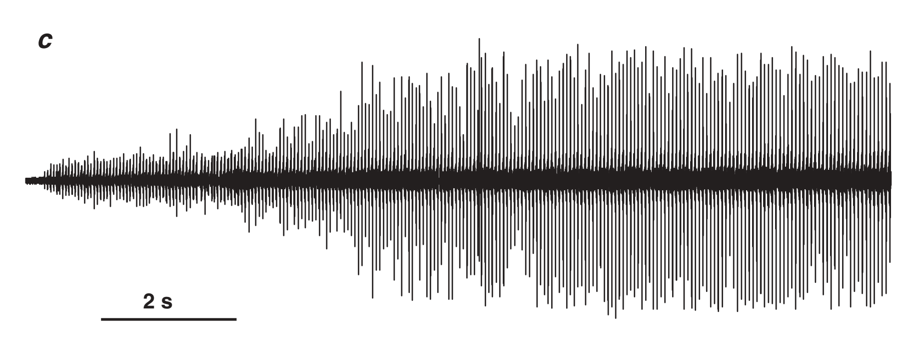
Productos conservados en atmósferas modificadas y al vacío

Los envasados con atmósferas modificadas ofrecen para el alimento fresco un alto grado de conservación, que llega incluso a duplicar o triplicar la duración del producto. No hay una fórmula exacta para garantizar una conservación ideal, sino que depende de cada alimento, de los gases empleados y del material de envasado.

En la aplicación industrial a los productos de la pesca de la técnica de atmósferas modificadas ha sido pionero el Grupo de Tecnología de Productos Pesqueros (TPP) del Instituto de Investigaciones Marinas de Vigo (CSIC). Contó con el apoyo económico de la empresa Freiremar S.A, que ha presentado ya diversas especies de pescado conservadas en EAM. En la actualidad este grupo continúa colaborando en este tema con otras empresas del sector alimentario, aplicando esta técnica de conservación al pescado fresco y diversos alimentos precocinados.

LAURA PASTORIZA ENRÍQUEZ
Instituto de Investigaciones Marinas (CSIC), Vigo





1. Modalidades de canto de proclamación: a *y* b*,* Stenobothrus grammicus*;* c*,* Omocestus kaestneri

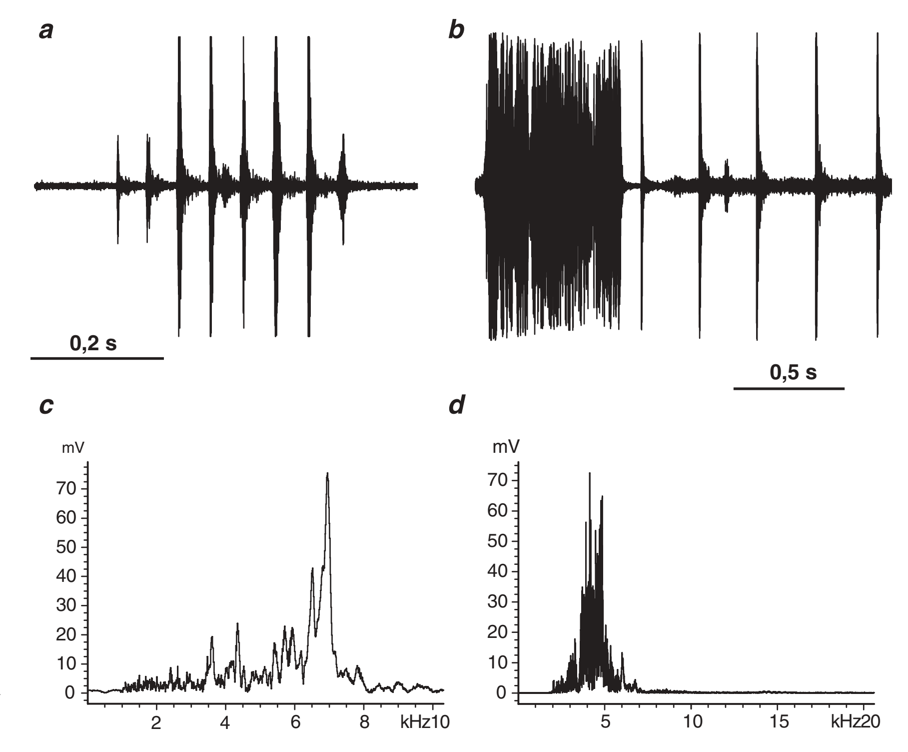
Mundo animal

Coro de saltamontes

Con los ardores del verano, el ambiente se llena del canto estridente de cigarras y chicharras. No es el único. En el coro animal se integran otros sonidos, menos intensos, producidos por saltamontes, insecto ortóptero como la chicharra, aunque de menor porte.

Los saltamontes, raros en zonas boscosas, abundan, hasta formar plaga, en lugares abiertos, claros de bosques, matorrales y zonas de cultivo. Por lo general son varias las especies de saltamontes que cohabitan en un mismo ambiente. Podemos incluso caracterizar los distintos ambientes por la combinación particular entre especies.

Los insectos emplean medios de comunicación de tipo táctil, visual, químico y auditivo para asegurar su reproducción y transmitir sus genes. Aunque queda mucho por avanzar en el conocimiento de la emisión sonora, parece ser que el canto se encuentra muy extendido entre los saltamontes. Este medio de comunicación, bastante eficaz en todo tipo de distancias, permite que el individuo cantor, el macho por lo común, sea localizado por las hembras de su misma especie.



2. Cantos de Sphingonotus coerulans corsicus: a*, oscilograma del canto de coro;* b*, oscilograma del canto de cortejo;* c*, espectro de frecuencia de emisión del canto de coro;* d*, espectro de frecuencia de emisión del canto de cortejo*

Muestran los saltamontes una pauta típica de emitir sonidos: la estridulación, que consiste en el raspado de una estructura en forma de cresta de una parte del cuerpo contra otra estructura saliente próxima a la primera, como si de un arco y unas cuerdas de violín se tratara. En muchos saltamontes la cara interior del fémur posterior presenta una fila, larga y densa, provista de salientes cuya forma varía con la especie. La fila estriduladora, así se llama, contiene púas.

El animal rasca la fila contra una de las venas de las tegminas. Al paso de una púa sobre la vena se genera una onda sonora; la sucesión de ondas ofrece un sonido complejo, a la vez que la membrana de la tegmina actúa como caja de resonancia amplificando el resultado. Gracias a esa disposición, incluso especies de tamaño mínimo emiten sonidos perfectamente audibles con una intensidad apreciable.

No obstante, ese mecanismo de estridulación constituye sólo uno de los varios ideados por la naturaleza. En ciertos casos la estructura dentada se encuentra en la tegmina y la cresta contra la que rasca en el fémur. Otros métodos de producción de sonido en los saltamontes son la percusión o tamborileo, al golpear las tegminas contra las rodillas medias, la crepitación en vuelo, la tremulación en reposo, el chasquido mandibular y alguno más.

La comunicación acústica garantiza la identificación de la especie a que pertenece un eventual compañero de cópula, estableciendo un mecanismo de aislamiento reproductivo de carácter precigótico. Esto supone un ahorro biológico de interés en medios frecuentados por especies muy próximas y, por tanto, similares que, en caso de no poder identificarse, podrían copular erróneamente con el consiguiente e inútil "gasto".

De hecho, existen especies simpátridas, como muchas del género *Chorthippus*, cuyas características morfológicas son extraordinariamente similares entre sí, pero cuyos sonidos difieren mucho y constituyen un medio seguro para la identificación específica. En la naturaleza es fácil entender que una hembra pueda elegir un macho inadecuado con el que copular si los de las distintas especies simpátridas no ostentan ningún signo inequívoco de identidad.

Las características del sonido que permiten esta identificación parecen ser la estructura temporal (se disciernen diferencias de milisegundos), y la frecuencia de emisión, tanto la principal como el espectro completo.

En las especies que muestran mayor complejidad en el comportamiento acústico se reconocen hasta cuatro tipos distintos de canto, siempre producido por los machos: proclamación, coro, cortejo y rivalidad.

Con el canto de proclamación, o de reclamo, el macho informa de su posición. La estructura de este canto diverge de una especie a otra; su gama abarca desde cantos prolongados y muy rítmicos, como el de *Omocestus kaesteneri* Harz, hasta cantos breves e iterativos, como el de *Stenobothrus grammicus* Cazurro.

Los cantos de coro son cantos de proclamación breves emitidos por diversos machos, próximos, que tratan de señalar las respectivas posiciones. Los cantos de cortejo se realizan, generalmente, en proximidad de una hembra; no suelen diferenciarse mucho de los de proclamación, aunque suelen ser más quedos y cadenciosos. No obstante, hay casos en que resultan ser muy distintos, como en *Sphingonotus coerulans corsicus* Chopard, donde la estructura temporal y el espectro de frecuencias no coinciden.

Por fin, el canto de rivalidad, que sirve para resolver eventuales encuentros o invasiones del territorio inmediato, sí se ajusta a un patrón bastante constante para la mayoría de las especies. Suele tratarse de sonidos breves emitidos alternativamente por los distintos machos involucrados; a menudo se acompañan de movimientos aparentes de las patas posteriores.

Estas actividades de comunicación acústica de los machos reciben respuesta por parte de la hembra. En ciertos casos esta respuesta es, también, sonora, de modo que se establece un sistema de reconocimiento mutuo que conduce a un aislamiento reproductor de gran valor biológico.

Mª Dolores García,
Mª Eulalia Clemente,
Juan José Presa
Area de Zoología.
Departamento de Biología Animal.
Universidad de Murcia

Polivalencia génica

La familia Snail

Se da por cierto en biología que los mismos genes y circuitos génicos sirven para funciones muy diversas. No sólo durante el desarrollo embrionario; también en el organismo adulto. Por supuesto, la actividad biológica de las proteínas determinadas por tales genes será, en términos bioquímicos, idéntica, ya que se trata de las mismas moléculas.

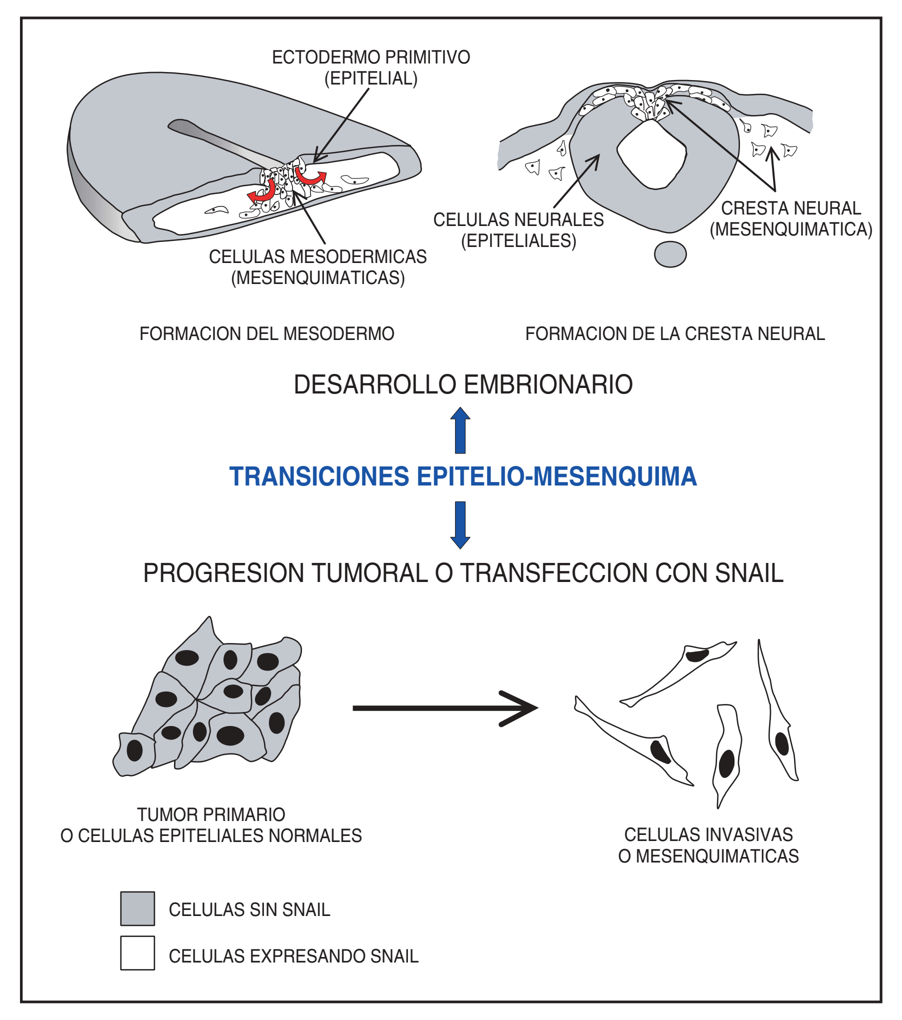
Pero puede cambiar la respuesta de la célula correspondiente, cuya reacción depende del contexto fisiológico en que se encuentre. Para responder a las señales entran en juego fenómenos de inducción, especificación y competencia. Dicho de otro modo, la función dependerá del momento y del lugar donde se expresen esos genes.

La familia Snail de factores de transcripción —proteínas nucleares que interaccionan con secuencias específicas de ADN— ejerce una función clave en los procesos embrionarios. Se descubrió en los años ochenta que la mutación en el gen *Snail* durante el desarrollo embrionario de la mosca del vinagre (*Drosophila melanogaster*) comportaba la aparición de embriones con defectos en el mesodermo. El aislamiento de dos genes homólogos en vertebrados (*Snail y Slug*) confirmó el papel de esta familia génica en la formación del mesodermo a lo largo del curso evolutivo.

En nuestro laboratorio se demostró en 1994 que el gen *Slug* resultaba decisivo para la migración del mesodermo y de la cresta neural, una población de células que se originan en el sistema nervioso central. Mesodermo y cresta —que proceden de tejidos epiteliales— se requieren para el correcto desarrollo del embrión, pues son las precursoras de los músculos, del esqueleto axial, del esqueleto craneofacial y del sistema nervioso periférico entre otras estructuras; ambos son, por tanto, poblaciones celulares multipotentes.

Las células epiteliales se caracterizan por la cantidad notable de moléculas de adhesión que las mantienen unidas entre sí, uniones que deben desaparecer para que puedan desprenderse de su lugar de origen y migrar hacia sus destinos. Este comportamiento celular implica una transformación de sus características que convierte en mesenquimática una célula epitelial. Por eso se habla de transición epitelio-mesénquima.

Las transiciones epitelio-mesénquima se producen bajo condiciones fisiológicas durante el desarrollo embrionario normal. Se dan también en el cáncer, asociadas a la malignización tumoral. Cuando un tumor adquiere la capacidad de invadir otros tejidos,



La familia génica Snail se utiliza tanto durante el desarrollo embrionario como durante la progresión tumoral para producir células normales o células malignas, respectivamente

algunas células se desprenden y adquieren capacidad migratoria a la manera de las células mesodérmicas o las de la cresta neural. Cabe, pues, suponer que intervengan las mismas moléculas en los dos procesos.

La transición epitelio-mesénquima entraña la pérdida de adhesión entre las células, su mutua separación y la migración individual. La adhesión entre células epiteliales viene mediada por cadherinas. La pérdida de la expresión de tales moléculas, y en particular de la cadherina E, constituye condición necesaria para la transición. Se ha observado, además, una relación estrecha entre su desaparición y la generación de la cresta neural y el mesodermo durante el desarrollo embrionario y también durante la invasión tumoral.

Hace cinco años, en colaboración con Amparo Cano, del Instituto de Investigaciones Biomédicas en Madrid, comenzamos a investigar si la activación patológica de la familia *snail* desencadenaba la adquisición del fenotipo invasivo y metastásico en tumores epiteliales, tal vez por medio de la represión de la expresión de la cadherina E.

Recientemente hemos logrado confirmar tal hipótesis en un modelo de ratón. La hemos extendido, además, a estudios en líneas celulares derivadas de carcinomas y melanomas humanos. En efecto, la expresión de *Snail* en células epiteliales normales induce una transición epitelio-mesénquima completa y confiere a las células propiedades tumorogénicas e invasivas. Más aún: la presencia del gen *Snail* puede considerarse un marcador de invasión y es, por tanto, un signo de mal pronóstico en tumores.

ANGELA NIETO
Instituto Cajal, CSIC,
Madrid

Biorritmos

circadianos

Los seres vivos están sometidos a ciclos predecibles de luz y temperatura, acoplados a la rotación de la Tierra sobre su eje. El comportamiento y la fisiología de la mayoría de los organismos siguen ciclos aproximados de 24 horas.

Durante mucho tiempo se creyó que los ritmos circadianos eran una respuesta pasiva de los animales y plantas al medio. Idea que se desvaneció cuando se observó que, si se aislaba un organismo en condiciones constantes de luz y temperatura, el biorritmo persistía, en libre curso, con un período cercano a las 24 h.

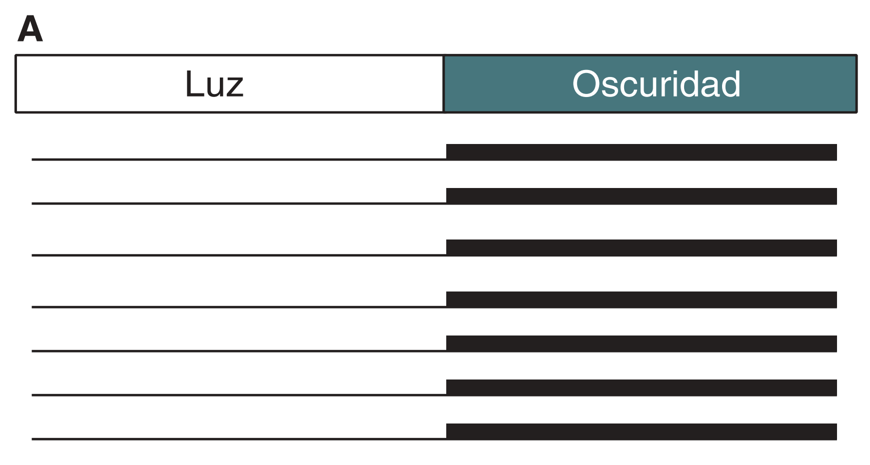
Se llama sistema circadiano al encargado de la generación y sincronización de los ritmos al ciclo solar. En 1972 se asoció el núcleo supraquiasmático (NSQ), una estructura bilateral situada a ambos lados del tercer ventrículo en el hipotálamo, con el sistema circadiano de mamíferos. La ablación del NSQ produce la pérdida de los ritmos circadianos; el trasplante de NSQ fetal a animales arrítmicos con lesiones en dicho núcleo restablece los ritmos.

El principal agente sincronizador del sistema circadiano estriba en la variación de la luz al amanecer y al anochecer. Los efectos de la luz sobre la regulación de los ritmos de secreción de melatonina y los de actividad-reposo, por ejemplo, se conocen bastante bien.

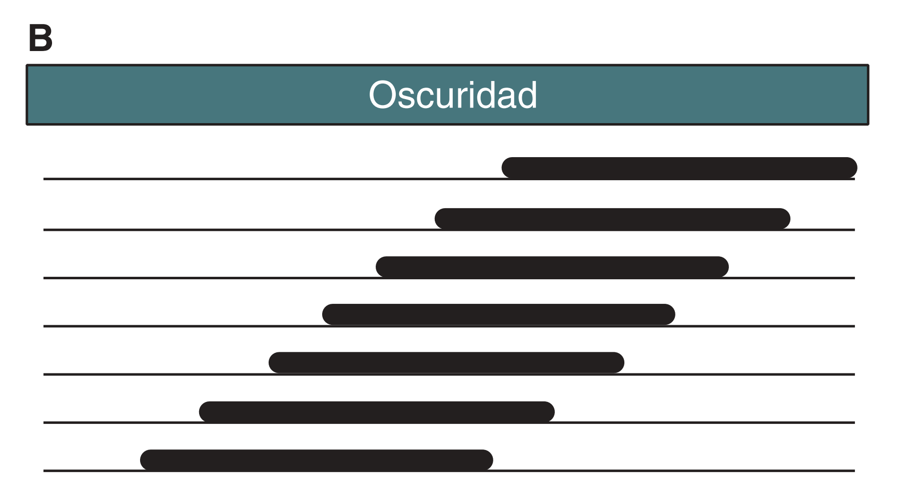
La síntesis de melatonina, principal producto de la glándula pineal, presenta un patrón circadiano de acuerdo con el cual sólo se fabrica durante las horas de oscuridad. La luz ejerce un doble efecto de control e inhibición de la síntesis de melatonina. A diferencia de lo que ocurre en otros vertebrados, la glándula pineal de los mamíferos no es sensible directamente a la luz. La información luminosa llega a la pineal a través de un tracto multisináptico cuyo origen está en la retina y pasa por el NSQ.

La supresión aguda de la síntesis de melatonina por un pulso de luz durante el período de oscuridad indica que las señales luminosas captadas por la retina y enviadas al NSQ actúan sobre la pineal.

Los ciclos de actividad-reposo presentan también un patrón circadiano, que secundan los animales mantenidos en condiciones de temperatura y



Actograma de un ratón rd/rd cl *donde se muestra que su período de actividad, barras gruesas, está restringido al período de oscuridad*



Actograma del mismo ratón sometido a condiciones de oscuridad constante. Su actividad locomotora se presenta en libre curso

oscuridad constantes. Si trasladamos esos mismos animales a ciclos de luz-oscuridad su período de actividad queda restringido a las horas de luz o de oscuridad, según se trate de animales de actividad diurna o nocturna. La luz produce, a través del NSQ, esta sincronización de los ritmos de actividad-reposo a los ciclos de luz-oscuridad. En mamíferos adultos las señales luminosas son percibidas por fotorreceptores retinianos y transmitidas al reloj circadiano situado en el NSQ vía el tracto retinohipotalámico.

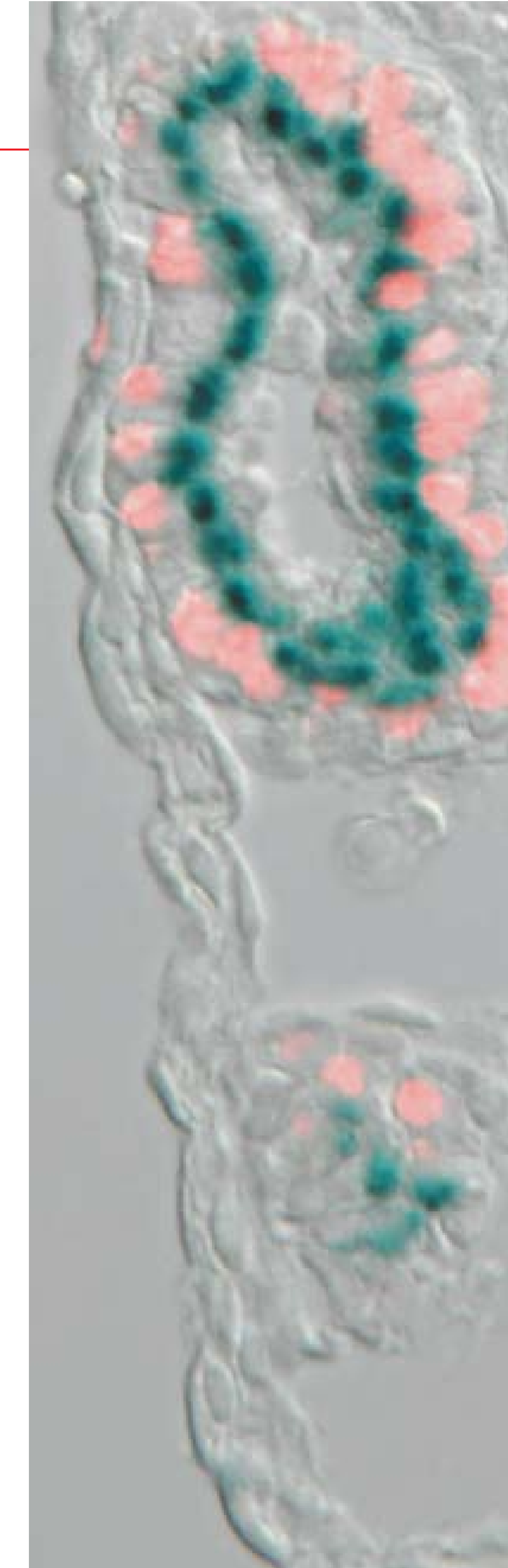
Durante mucho tiempo fue opinión común que los conos y los bastones, células encargadas de mediar las respuestas visuales, se ocupaban también de captar las señales luminosas que sincronizan al NSQ. Pero experimentos recientes con distintas cepas de ratones han descartado esa posibilidad. Los ratones *rdta/cl* carecen de conos verdes y bastones debido a la introducción de dos transgenes sintéticos que eliminan estas células en las primeras fases del desarrollo.

Sin embargo, estos ratones muestran cambios de fase en sus ciclos de actividad-reposo, en respuesta a pulsos de 15 minutos de luz monocromática de 509 nanómetros, iguales a las encontradas en los animales control. Por su parte, los ratones *rd/rd cl*, que carecen de bastones debido a la mutación *rd/rd* y de conos verdes debido al transgén *cl*, presentan una inhibición aguda de la síntesis de melatonina por un pulso de luz monocromática de 15 minutos, similar a la encontrada en ratones normales. Estos resultados demuestran que los ojos de mamíferos contienen un tipo de célula fotorreceptora (diferente de conos y bastones) capaz de regular las respuestas circadianas del comportamiento a la luz.

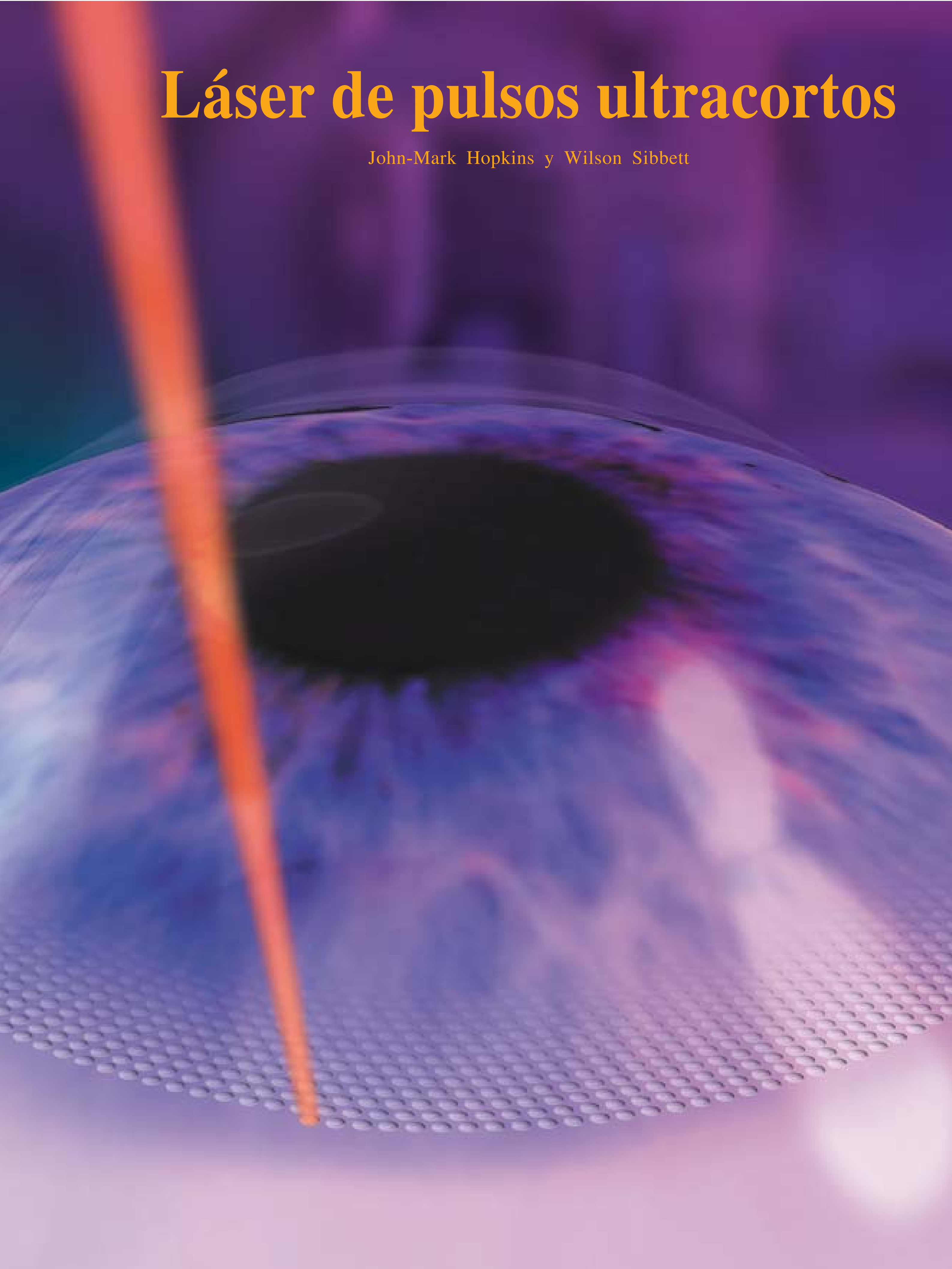
MARTA MUÑOZ LLAMOSAS
Colegio Imperial de Ciencia, Técnica y Medicina
Hospital Charing Cross, Londres

Células renales originadas en el cerebro

Esta imagen es un auténtico acontecimiento para los biotecnólogos. Se observa una estirpe derivada de determinadas células del cerebro en ratones adultos, cuyo origen señalaron los investigadores mediante un marcador de ingeniería genética, una molécula a la que deben su tonalidad azul verdosa. Estas células se transformaron en tejido renal que fabrica una proteína típica (Pax2, de color rosa). Jonas Frisén y sus colaboradores, del Instituto Nobel de Medicina de Estocolmo, descubrieron que estas células pueden generar casi todos los tejidos del organismo, no sólo el renal. Hasta ahora tamaña capacidad se creía reservada a las células embrionarias. Los investigadores suecos inyectaron células madre nerviosas, extraídas del cerebro de ratones adultos, en embriones de ratón. Posteriormente identificaron células derivadas de ellas en riñones, pulmones, corazón, hígado, estómago e intestino de esos animales. El resultado alumbra una posibilidad fascinante: la obtención de órganos de repuesto a partir de células nerviosas en lugar de células madre embrionarias. Se evitaría así un espinoso asunto ético.







Láser de pulsos ultracortos

John-Mark Hopkins y Wilson Sibbett

La más breve de las obras humanas, el destello de luz de láser con una duración de millonésimas de nanosegundo, es útil en delicadas operaciones oculares, comunicaciones de banda muy ancha y el estudio, congelado su movimiento, de las reacciones moleculares

¿Cuánto tarda usted en leer esta frase? En reconocer la primera letra sólo unos milisegundos. Unos 0,05 milisegundos, 50 microsegundos, tardan en difundirse las moléculas a través de la sinapsis, que transmiten una señal de una neurona de su cerebro a otra. ¿Tiene la revista a una distancia cómoda para la vista? La luz tarda uno o dos nanosegundos en ir de la página a su ojo y unos 20 picosegundos en atravesar el cristalino. Pese a ello, es como si la duración de estos breves sucesos naturales se perdiese en un tiempo legendario cuando se los compara con los más cortos que el ser humano haya producido, mil veces más rápidos: los pulsos de luz de láser, que sólo existen unos femtosegundos (milbillonésimas de segundo).

Cuesta hacerse una idea de cuán breve es un femtosegundo (10^{-15} segundos). Es a un segundo lo que éste a 32 millones de años. Dicho de otra manera, ¡en un segundo pasan más de diez veces más femtosegundos que horas ha habido desde la gran explosión inicial! Algunos de los procesos fundamentales del universo —por ejemplo, el movimiento de los electrones entre átomos y la ruptura o formación de los enlaces moleculares— suceden en escalas temporales de cientos de femtosegundos o menos. Con pulsos que duran femtosegundos se han registrado y estudiado con detalle fenómenos así de fugaces; recuerda a cómo Harold E. Edgerton, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, produjo con destellos de luz que duraban microsegundos las inolvidables fotografías del impacto de una gota o de balas en vuelo. Gracias a la obra pionera de Ahmed H. Zewail, del Instituto de Tecnología de California, por la que se le ha concedido el premio Nobel de Química, los químicos han visto de qué manera se producen las reacciones químicas a escalas temporales de unos cientos de femtosegundos. Además, se ha "congelado" con "instantáneas" la dinámica de los electrones en el interior de los semiconductores para diseñar mejores circuitos optoelectrónicos con los que se logre el procesamiento de señales aún más rápido que piden las industrias de ordenadores y telecomunicaciones.

La ciencia y la técnica de los pulsos ultracortos han logrado muchos y apasionantes avances desde su nacimiento a mediados de los años sesenta. En concreto, en los últimos diez años se han obtenido pulsos que duran menos de 10 femtosegundos y se ha asistido a la aparición de una nueva generación de láseres de pulsos ultracortos, compactos y versátiles, un cambio revolucionario con respecto a sus antecesores, grandes, impredecibles y ávidos de energía. Estos láseres de nueva planta, basados en complejos fenómenos ópticos no lineales y en los avances que al mismo tiempo han conocido los láseres de diodo, se hallan cada vez más cerca de tener la fiabilidad y cumplir las severas especificaciones que se requieren en muchas aplicaciones industriales y clínicas. En el momento en que estamos entrando en el siglo XXI, la variedad e intensidad de los láseres de pulsos ultracortos son cada vez más impresionantes: sus haces barren el espectro electromagnético, de los rayos X a los T (radiación de teraherz, más allá del infrarrojo), y generan picos de potencia óptica colosales, hasta de petawatt (millardos de megawatt). El resultado es la aparición de muchas nuevas aplicaciones en física, química, biología, medicina y optotécnicas digitales que atraen el interés de científicos e industriales de todo el mundo.

1. LOS PULSOS ULTRACORTOS DE LASER levantan un tapete del estroma superficial de la córnea en una versión mejorada de la técnica quirúrgica ocular LASIK (queratomileusis *in situ* por láser). Para ello, crean una capa de perforaciones a una profundidad constante. Los agujeros son menores y el haz está mejor enfocado que en esta representación artística.

La más afilada de las cuchillas

Muchas aplicaciones de los láseres de pulsos ultracortos aprovechan la gran potencia momentánea que cada pulso proporciona. Aunque la potencia media del láser puede ser bastante modesta y la energía total contenida en el impulso pequeña, la brevísima duración de cada uno hace que el pico instantáneo de potencia resulte grande. En un sistema ordinario, el intervalo entre los pulsos multiplica por 100.000 la longitud de los propios pulsos y, por tanto, el pico de potencia es unas 100.000 veces la potencia media. De acuerdo con ello, un pulso de 100 femtosegundos con una modesta energía de tres microjoule (insuficiente para elevar siquiera una millonésima de grado la temperatura de una gota de agua) suministra un pico de potencia de 30 megawatt.

Con una luz de tal potencia, enfocada en una parcela minúscula, se produce la ablación de muchos materiales. Por eso los pulsos ultracortos sirven para operaciones de micromecanización: fresa, taladro, corte y soldadura microscópicos. La precisión alcanzada puede ser mayor que el foco del haz, si se dispone la intensidad del pulso cuidadosamente de manera que sólo la parte central, más brillante, del haz supere el umbral de ablación del material. El pulso transfiere la energía al punto de enfoque con tal celeridad, que el calor no llega a difundirse hacia las zonas sin irradiar del contorno; así se garantizan acabados regulares y precisos. Las posibilidades de esta técnica se ponen de manifiesto en la micromecanización precisa del diamante, carburo de titanio y esmalte dentario. Sorprende que los láseres puedan cortar sin riesgo explosivos potentes; vaporizan lo que hay en el punto de corte sin detonar la carga adyacente. Un procedimiento de posible aplicación en el desmantelamiento de almacenes de armas.

Abundan las aplicaciones quirúrgicas. En cirugía microvascular con un láser de pulso ultracorto podemos perforar en las paredes del corazón orificios sutiles por

Nociones fundamentales

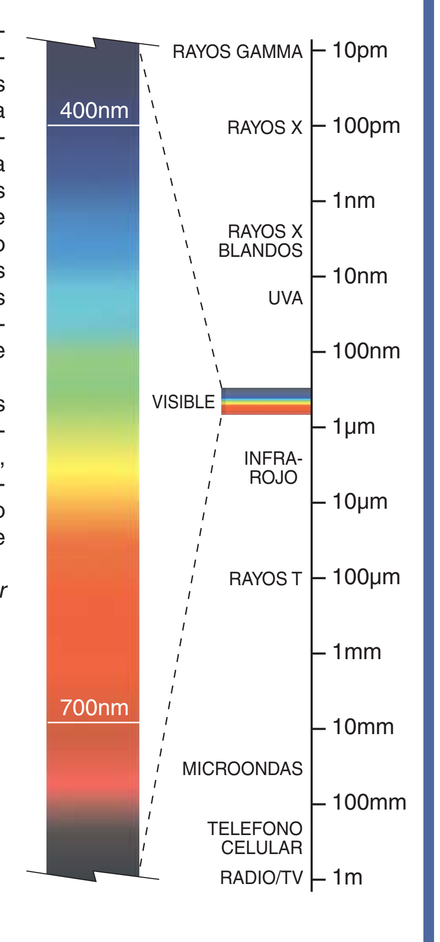
Aunque la radiación electromagnética tiene mil caras, nosotros estamos familiarizados con la visible. Los colores del arco iris se distinguen por una propiedad, la longitud de onda de la luz, entre, aproximadamente, los 380 nanómetros (nm) del más oscuro de los violetas perceptibles y los 750 del más rojo de los rojos. La mayoría de los colores que nos rodean son mezcla de muchas longitudes de onda diferentes, en particular los marrones, grises y apastelados, que no salen en el arco iris. El espectro electromagnético se extiende mucho más allá de la luz visible, hasta los rayos gamma en el extremo de las longitudes de onda más cortas y las frecuencias más altas, y hasta las ondas de radio en el otro cabo. Las moderadas ondas que emiten las corrientes a 60 hertz de casa caerían unas siete divisiones por debajo de la marca inferior del diagrama de la derecha.

En la manera de empaquetarse los haces de luz no sólo cuentan las diferencias entre longitudes de onda. La luz suele ser incoherente. Los láseres producen luz coherente. La luz puede llegar en una onda continua, como olas que rompen sin cesar en la playa, o en pulsos, como un tsunami. Al comprimirla en los más breves pulsos coherentes —unos cuatro femtosegundos duran los más cortos— se crea un instrumento sumamente versátil, con una mezcla notable de potencia y delicadeza.

—Graham P. Collins, redactor

Grande y pequeño

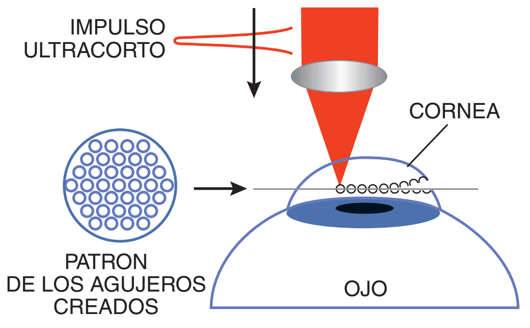
Prefijo	Factor	Nombre	Prefijo	Factor	Nombre
mili (m)	10^{-3}	milésima	kilo (k)	10^{3}	mil
micro (μ)	10^{-6}	millonésima	mega (M)	10^{6}	millón
nano (n)	10^{-9}	milmillonésima	giga (G)	10^{9}	mil millones
pico (p)	10^{-12}	billonésima	tera (T)	10^{12}	billón
femto (f)	10^{-15}	milbillonésima	peta (P)	10^{15}	mil billones
atto (a)	10^{-18}	trillonésima	exa (E)	10^{18}	trillón
zepto (z)	10^{-21}	miltrillonésima	zetta (Z)	10^{21}	mil trillones
yocto (y)	10^{-24}	cuatrillonésima	yotta (Y)	10^{24}	cuatrillón



donde pase sangre oxigenada al músculo cuyos vasos estén obturados por trombos. Los pulsos ultracortos resultan de suma eficacia aquí porque su baja potencia media reduce los daños colaterales de los tejidos. En el Laboratorio Nacional Lawrence en Livermore han utilizado pulsos ultracortos, con un hábil sistema de seguimiento de la intervención, para retirar intrusiones óseas de la médula espinal sin dañar el tejido nervioso adyacente. Y un equipo conjunto de las universidades de Michigan y Heidelberg han efectuado un tipo de cirugía ocular notable: un haz de pulsos ultracortos enfocado a una profundidad exacta de la córnea crea una pequeña madeja de burbujas interconectadas, o cavitaciones; se puede entonces levantar, sin desprenderlo del todo, un tapete de la córnea y dejar así al descubierto un disco del tejido de abajo, que se extrae. Se repone entonces la lámina, intacta la superficie lisa; el aplanamiento resultante de la córnea corrige la miopía. El tapete recortado por el láser es más regular que el de la técnica ordinaria, con cuchilla, y se tiene mayor control sobre la forma y localización de la incisión.

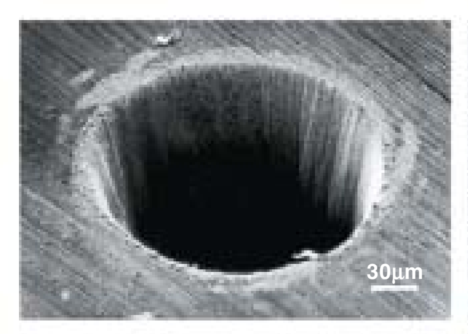
Formación de imágenes

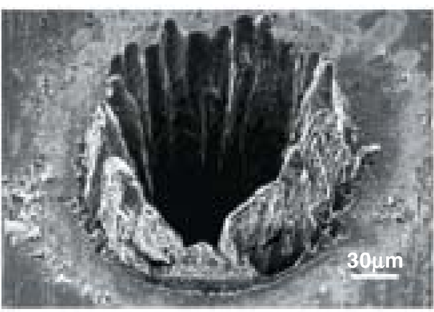
Una aplicación evidente de cualquier fuente nueva de luz es la creación de imágenes por procedimientos inéditos. En biología y medicina la formación de imágenes suele depender de tinciones especiales o moléculas naturales de los tejidos que exhiban fluorescencia en reacción a una luz de longitud de onda corta, violeta, por ejemplo. De ordinario una molécula absorbe un solo cuanto de luz, un fotón, y a continuación emite otro. El emplear una luz de mayor longitud de onda ofrece muchas ventajas,

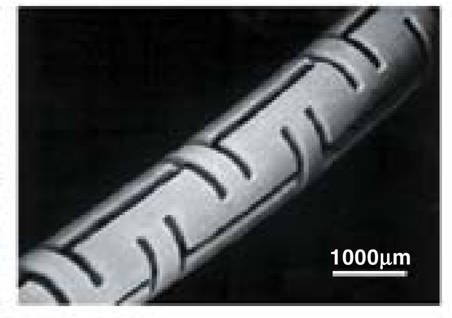


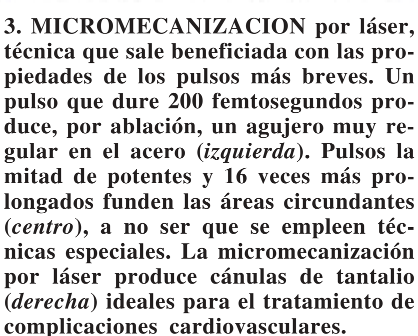


2. TRATAMIENTO experimental ocular que rebana una lámina de la córnea perforando pequeños agujeros en los puntos donde se enfoca el láser (*izquierda*). Más cortes así eliminan un disco subsuperficial de la córnea (*derecha*). Al reponer el tapete se aplana la córnea y se corrige la miopía. En la cirugía LASIK ordinaria se levanta el tapete con hoja cortante, procedimiento más arriesgado que produce, además, un corte menos regular.









3. MICROMECANIZACION por láser, técnica que sale beneficiada con las propiedades de los pulsos más breves. Un pulso que dure 200 femtosegundos produce, por ablación, un agujero muy regular en el acero (*izquierda*). Pulsos la mitad de potentes y 16 veces más prolongados funden las áreas circundantes (*centro*), a no ser que se empleen técnicas especiales. La micromecanización por láser produce cánulas de tantalio (*derecha*) ideales para el tratamiento de complicaciones cardiovasculares.

pero la energía de esos fotones es menor y han de actuar en sincronía dos o más para excitar cada molécula.

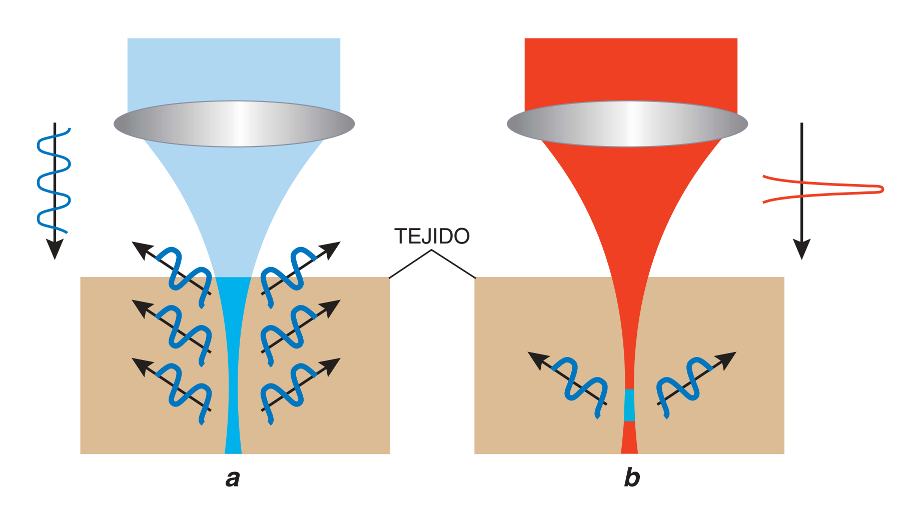
Esa excitación multifotónica sólo adquiere interés a intensidades muy grandes. Los pulsos ultracortos proporcionan las intensidades requeridas y, al mismo tiempo, transfieren una potencia media lo bastante baja como para no dañar los tejidos. Además, una luz de longitud de onda más larga penetra en los tejidos con mayor eficacia y resulta menos lesiva para las células que la de longitudes más cortas. Puede ajustarse la intensidad de manera que la fluorescencia se produzca sobre todo en el foco del haz; así es mucho mayor la resolución. Esta técnica, creada por Watt W. Webb, produce imágenes tridimensionales del tejido vivo con una nitidez y definición desconocidas. Un método que guarda relación con éste crea imágenes tridimensionales de los microchips de silicio a través de su recubrimiento de plástico mediante la detección de corrientes eléctricas inducidas por las excitaciones multifotónicas.

Otro método nuevo de generación de imágenes es por medio de los rayos T, la radiación de terahertz, con longitudes de onda entre 15 micras y un milímetro, las más largas del infrarrojo. Los rayos T pueden penetrar hondamente en numerosos materiales que con longitudes de onda más cortas, como la de la luz visible, son opacos; muchos materiales corrientes vienen a ser transparentes a la radiación de terahertz. Recíprocamente, los rayos T pueden lograr imágenes con una resolución más fina que la posibilitada con las microondas, que presentan longitudes de onda de alrededor de un centímetro y más.

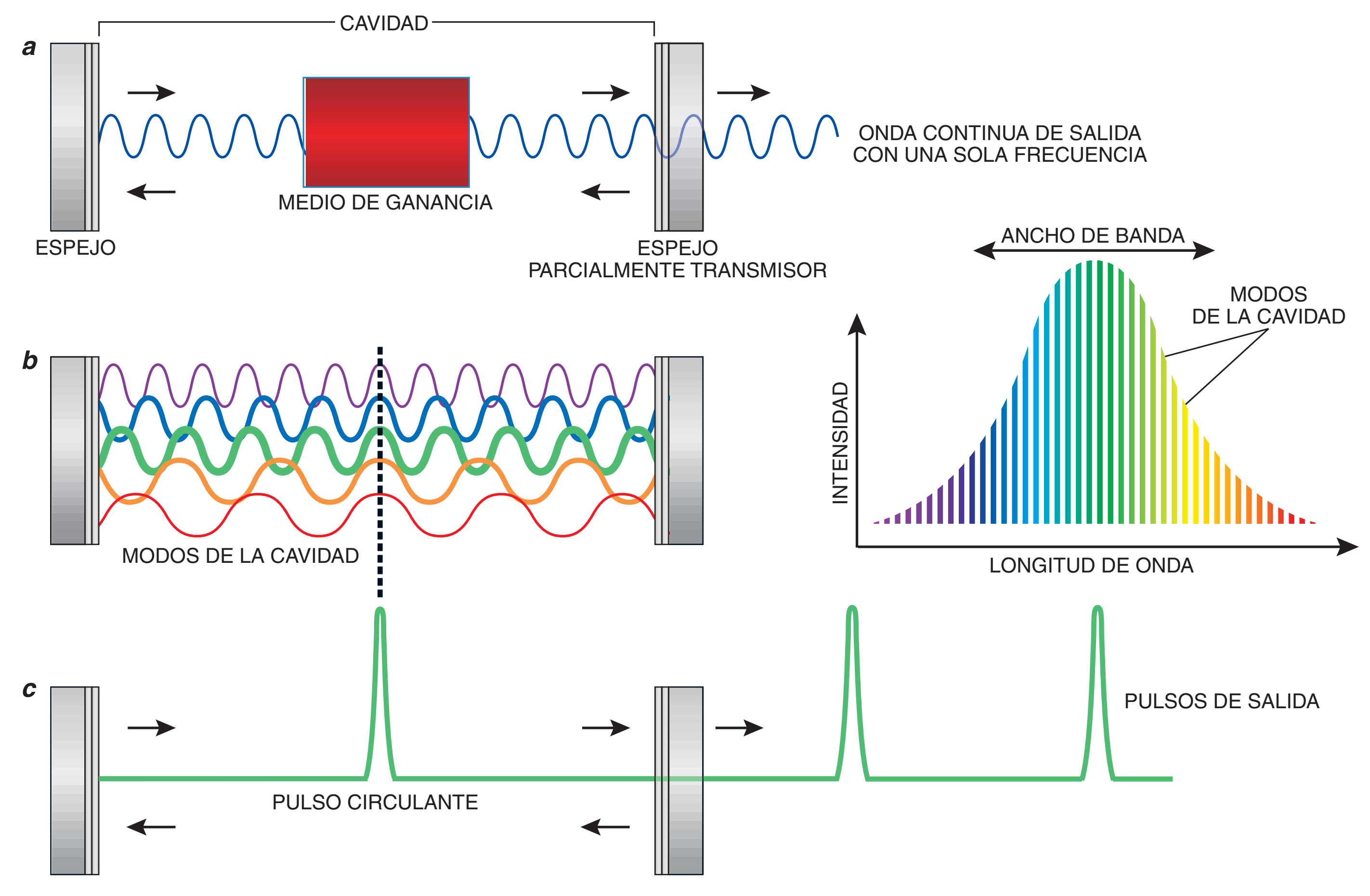
El grupo de David Auston, de la Universidad de Columbia, consiguió en los años ochenta crear rayos T disparando pulsos ultracortos a unas estructuras semiconductoras preparadas a propósito. Los pulsos inducían flujos de electrones que, a su vez, generaban los rayos T. Los rayos T generados por los pulsos de láser se separan con mayor facilidad de la radiación y del ruido de fondo y distinguen capas de materiales muy similares, como los diferentes tipos de tejido blando; merced a la técnica de creación de imágenes con rayos T se distinguen con claridad los tejidos quemados de los sanos. Martin Nuss y sus compañeros de los Laboratorios Bell obtuvieron las primeras imágenes con pulsos de terahertz en 1995; aunque esta técnica sigue instalada en sus primeras fases de desarrollo, se ha aplicado ya a la inspección de componentes electrónicos y a la detección precoz del deterioro dentario y de otros tejidos enfermos. Los rayos T podrían convertirse en un medio eficaz para detectar armas cerámicas en los aeropuertos, difíciles de descubrir con los equipos habituales de rayos X.

En la industria, los láseres de pulsos ultracortos muestran todo su valor inapreciable cuando se trata de acometer mediciones precisas en la fabricación de microchips muy complejos. Controlan el espesor del metal y de las capas de semiconductor sin interrumpir la producción, que así rinde más. Les espera también su posible aplicación comercial en las telecomunicaciones: en 1997 el grupo de Nuss transmitieron con pulsos de femtosegundos más de 200 canales de datos por una fibra óptica.

Diez años atrás nadie sospechaba semejante virtualidad. Por entonces los láseres de pulsos de femtosegundos eran voluminosos, ineficaces y poco fiables. Hoy, gracias a avances revolucionarios, hay láseres compactos de femtosegundos que no fallan y pueden integrarse, como un componente interno más, en un equipo portátil de formación de imágenes o de diagnóstico. Esta revolución en el diseño de los láseres de pulsos de femtosegundos constituye todo un capítulo de la historia reciente de la técnica.



4. LA FLUORESCENCIA inducida por láser para la formación de imágenes emite luz a lo largo de todo el haz (*a*). Los pulsos ultracortos de longitudes de onda mayores mejoran la calidad de la imagen porque centran la generación de fluorescencia en el foco del láser (*b*).



5. LA RETROALIMENTACION Y LA AMPLIFICACION mueven el proceso de creación de la luz de láser. La luz que se refleja adelante y atrás entre dos espejos (*a*) se amplifica cada vez que pasa por un medio de ganancia excitado. A través de un espejo parcialmente transmisor sale por un extremo un haz continuo. Cuando oscilan en la cavidad en precisa sincronía muchas longitudes de onda diferentes, o modos, de la luz (*b*), se suman y crean un pulso intenso (*c*). Por el espejo parcialmente transmisor sale una secuencia periódica de pulsos.

Todo láser se funda en la amplificación óptica y la retroalimentación. A finales de los años sesenta, el músico de rock Jimi Hendrix despertaba la admiración del público cuando la retroalimentación acústica continua que creaba al poner su guitarra Stratocaster frente a un amplificador generaba un sonido estremecedor. Antes, en ese mismo decenio, Theodore H. Maiman había hecho algo parecido con la luz: demostró que una varilla de rubí excitado, colocada en una cavidad para que hubiera retroalimentación óptica, producía un haz intenso de luz de láser. La cavidad no es más que el espacio entre dos espejos; la varilla hace de medio de ganancia, o amplificador óptico. La luz, que rebota atrás y adelante en la cavidad, va ganando en intensidad. Por lo usual uno de los espejos es parcialmente transmisor y deja que una porción de la luz escape y forme el haz de láser habitual. La cavidad sólo tolera luz de ciertas longitudes de onda, o modos, las que quepan un número entero de veces entre los espejos. Los modos constituyen el equivalente óptico de los armónicos de las cuerdas de la guitarra de Hendrix.

Un láser de onda continua bien controlado emite un haz constante de luz, cuyo color corresponde a la frecuencia de uno de esos modos. Un impulso corto de láser, en cambio, debe contener un gran conjunto de frecuencias, a la manera de un acorde de muchas notas. (Este requisito tiene que ver con el principio de incertidumbre de Heisenberg; un pulso más corto ha de tener una anchura de banda mayor, tal y como una partícula confinada en una posición precisa presentará una amplia dispersión de velocidades posibles.) El espectro asociado a un pulso de luz de 10 femtosegundos, por ejemplo, abarca unos 100 nanómetros. Es un intervalo enorme: cubriría un tercio de las longitudes de onda de la luz que podemos ver, todos los colores, del cian al naranja. El haz rojo de un láser de diodo de onda continua ordinario, por contra, tiene una anchura de banda inferior a un nanómetro.

Para que se genere un pulso ultracorto, esos miles de modos deben estar en fase. Imagínese una serie de campanas, cada una de un tono diferente, en la torre de una iglesia. Cuando tañen al azar resulta una insoportable cacofonía. Pero si doblan en sincronía, a intervalos regulares, se oye una secuencia de sonoros acordes igualmente espaciados. De manera similar, cuando el láser funciona con “los modos trabados” toda la luz de la cavidad óptica queda encerrada en un pulso ultracorto individual que circula entre los espejos. El láser emite una secuencia periódica de pulsos de luz a través de su espejo parcialmente transmisor.

Cristales de ganancia de banda ancha

Amplificar un intervalo grande de frecuencias requiere un medio especial de ganancia de banda ancha. La primera generación de láseres de impulso sintonizables (en los que se pueden variar las frecuencias que producen) usaban chorros de tin-

tes orgánicos disueltos en disolventes viscosos. Grandes, complicados y de mantenimiento caro, la salida media era de sólo unos miliwatt, pese a que su funcionamiento requería mucha energía eléctrica. Para muchas aplicaciones los láseres de colorante ofrecían un rendimiento demasiado limitado y no podía confiarse en ellos si había que generar los pulsos más breves (de 20 a 30 femtosegundos). Además, las combinaciones de disolvente y colorante no carecían de riesgos, especialmente cuando circulaban a alta presión por boquillas estrechas. (Cada pulso agotaba ópticamente los colorantes y había que renovarlos rápidamente.)

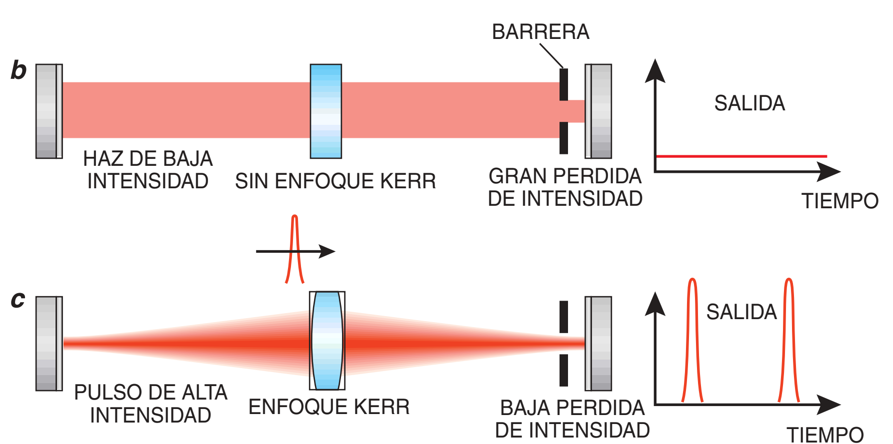
El primer paso importante hacia unos láseres de femtosegundos más cómodos fue el descubrimiento de los modernos cristales de banda ancha, que pueden emitir y amplificar longitudes de onda entre el visible y el infrarrojo medio (unos 3000 nanómetros). Por su difusión sobresale el zafiro dopado con titanio, o Ti:zafiro, creado por Peter Moulton, del MIT. Este material amplifica longitudes de onda entre los 700 y los 1100 nanómetros y tolera pulsos de menos de cuatro femtosegundos.

Con los nuevos materiales de banda ancha había que lograr que el láser "trabase" los muchos millones de modos, de manera que estuviesen todos en fase y se produjese una secuencia periódica de pulsos en vez de una luz de onda continua. Propósito nada fácil. Uno de los primeros procedimientos para generar pulsos de láser ultracortos con Ti:zafiro empleaba dos cavidades ópticas acopladas, cuyas longitudes coincidían con gran precisión. Pero mientras se optimizaba ese láser de modos trabados en 1989, el grupo de la Universidad de St. Andrews se quedó estupefacto al ver que también se producían los pulsos con una sola cavidad.

Esos investigadores y otros laboratorios llegaron a la conclusión de que el autotrabarse de los modos debíase al efecto Kerr óptico que se producía en el interior del cristal de Ti:zafiro. Aflora este fenómeno cuando una luz intensa viaja en un material transparente, vidrio o Ti:zafiro, por ejemplo, más despacio que la menos intensa. Un haz de láser es más intenso en su centro; por tanto, la luz de los bordes viaja con mayor celeridad. El resultado equivale a que el haz pase por una lente convexa; se denomina autoenfoque, o enfoque con lente Kerr, del haz de láser. Este efecto autotraba, o traba con lente Kerr, los modos al degradar la amplificación de un haz continuo con respecto a la de un impulso de luz circulante. El haz continuo debilitado se extiende por toda la longitud de la cavidad; su intensidad se mantiene demasiado baja como para que sufra un enfoque Kerr. Se desarrolla un pulso cuando una fluctuación transitoriamente grande de la intensidad de la luz, parte del ruido óptico de la cavidad, experimenta el enfoque Kerr y, por tanto, se amplifica mucho. El pulso resultante se apropia de la energía de amplificación disponible. En esencia, el láser "prefiere" concentrar su energía en ese pulso y, para ello, está presto a trabar los modos en fase. En las primeras exhibiciones del trabado de modos con lente Kerr en St. Andrews, el proceso de evolución del pulso se puso en marcha golpeando ligeramente uno de los espejos de la cavidad para inducir un destello de ruido óptico.

El efecto Kerr extiende además la anchura de banda de un impulso que se está desarrollando; fenómeno del que puede sacarse partido. El trabado de modos con lente Kerr produjo los primeros pulsos ultracortos que podían sintonizarse en un intervalo de frecuencias ancho, con potencias sin precedentes. Ha resultado ser la forma más simple y elegante de generar pulsos de femtosegundos que se conoce. Los láseres de pulsos ultracortos modernos incorporan varios refinamientos, pero conservan la sencillez básica del trabado de modos.

JOHN-MARK HOPKINS y WILSON SIBBETT trabajan en la facultad de física y astronomía de la Universidad de St. Andrews. Hopkins realizó una tesis de grado excelente sobre láseres compactos de bajo umbral y pulsos de femtosegundos, en el grupo de investigación de láseres de pulsos ultracortos dirigido por Sibbett. Catedrático de filosofía natural de St. Andrews desde 1985, Sibbett pertenece al Consejo de Investigaciones Científicas y de Ingeniería del Reino Unido. St. Andrews, la universidad más antigua de Escocia, se fundó hace $1{,}86 \times 10^{25}$ femtosegundos, en el año 1410.



6. EL EFECTO KERR OPTICO hace que la luz de una intensidad suficientemente alta viaje más despacio que la menos intensa. El medio Kerr actúa sobre un haz como una lente focalizadora que fuera en su centro muy intensa (*a*). Una barrera con un agujero pequeño (*b*) suprime la salida continua del láser, que así no puede adquirir la intensidad requerida para provocar el efecto Kerr. Este enfoca un pulso intenso (*c*) de suerte tal, que atraviesa por completo la apertura y recibe una amplificación máxima.

Nuevos espejos y bombas

Con la aparición de un ingenioso tipo de espejo absorbente hecho de semiconductores se dio otro paso importante. Un componente absorbente de tales espejos les quita reflectividad cuando se opera con luz escasa, pero si la intensidad se multiplica el absorbente se satura, con el aumento consiguiente de la reflectividad especular. Al reflejar mejor las intensidades grandes, estos espejos favorecen en la cavidad la generación de pulsos en vez de primar la formación de ondas continuas, de manera muy parecida a lo que pasa con

7. UN LASER DE MODOS TRABADOS CON LENTE KERR, similar al primero que se construyó, produce pulsos ultracortos de gran potencia. Un haz de láser verde excita el cristal de zafiro dopado con titanio, que genera y amplifica el haz rojo-infrarrojo en el interior de la cavidad definida por los cuatro espejos. La apertura de modos trabados suprime el láser de intensidad constante (*figura 6*); los prismas corrigen la dispersión. La apertura sintonizadora intercepta todas las longitudes de onda, excepto la parte deseada del espectro de luz roja. Los pulsos salen periódicamente a través del espejo semitransmisor.

8. LA MINIATURIZACION de los nuevos láseres de pulsos ultracortos ha revolucionado sus posibilidades en el mundo real. El fotografiado aquí está alimentado por baterías AA y transfiere medio kilowatt de pulsos de luz. (La pelota de golf dice la escala.)

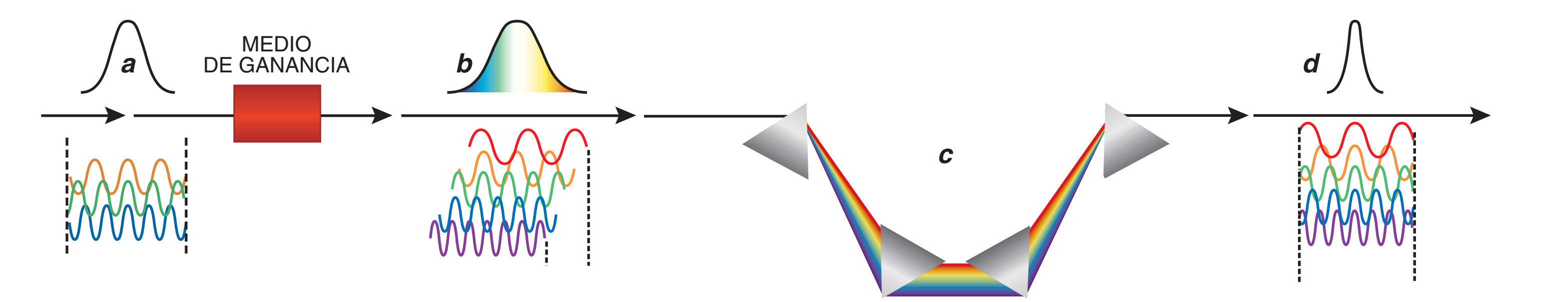
el trabado de modos con lente Kerr. Estos dispositivos gozan de la ventaja añadida de que ponen en marcha la evolución de un pulso a partir de niveles muy bajos de ruido de fondo en el seno de la cavidad. Los primeros en crear láseres así fueron los Laboratorios Bell de AT&T.

El descubrimiento de estos mecanismos modernos de trabar los modos hizo que fuese mucho más fácil manejar los láseres de pulsos ultracortos y reportó un inmediato éxito comercial a los láseres de femtosegundos de Ti:zafiro. Sin embargo, hay aún que conseguir mejoras fundamentales, sobre todo en las fuentes de la excitación, o bombas, de esos sistemas de láser. Como el amplificador de una guitarra, un láser necesita energía para amplificar la luz de su haz. Cuando se usan cristales de Ti:zafiro, esa energía impulsora se la proporciona un láser de bombeo de onda continua: el haz de bombeo ilumina el interior del cristal y excita los átomos, que a continuación se relajan aportando más luz al haz de láser de pulsos. Los primeros láseres de Ti:zafiro eran bombeados por láseres de argón ionizado, grandes dispositivos que consumen decenas de kilowatt de energía eléctrica para producir de 10 a 20 watt de luz azulverdosa. El coste de operación y mantenimiento de esos láseres los hacía todavía menos atractivos.

Hoy podemos bombear el Ti:zafiro y materiales afines con eficaces láseres de estado sólido (bombeados, a su vez, por láseres de diodo pequeños y de alta potencia). Los láseres de estado sólido, bombeados por los de diodo, superan en casi todo a sus predecesores de argón ionizado: ofrecen hasta 10 watt de luz verde en un haz de mejor calidad y ocupan un décimo de espacio que los otros, se conectan a un enchufe ordinario y su funcionamiento cuesta bastante menos.

El paso siguiente salta a la vista: eliminar el láser de estado sólido intermedio y bombear directamente un láser de pulsos ultracortos con un láser de diodo. Esta reducción de tres etapas a dos achicará el tamaño del aparato y mejorará el rendimiento. Por desgracia, no es probable que se bombee directamente el Ti:zafiro en un futuro cercano, porque no existen todavía láseres de diodo de las longitudes de onda y la potencia de salida que se requieren. Pero los diodos sí han bombeado otros cristales de láser que han producido pulsos de salida mejores que los de algunos láseres de Ti:zafiro. Un ejemplo de material que requiere una potencia menor son las colquiritas, cuyo nombre procede de la mina de estaño boliviana de Colquiri, donde se las descubrió. Dopadas con cromo, las colquiritas son una excelente opción alternativa al Ti:zafiro, pues oscilan en un intervalo equiparable de longitudes de onda y se las puede bombear con láseres de diodo rojos disponibles en el comercio. Gracias a las colquiritas con buenas propiedades ópticas que se sintetizaron por vez primera en el Lawrence de Livermore se han diseñado cavidades de pulsos ultracortos más eficientes y plenamente integradas.

En la Universidad de St. Andrews hemos mejorado el rendimiento y la compactación de los láseres de pulsos ultracortos bombeados directamente por diodo; lo hemos logrado reduciendo la energía de bombeo que necesita el láser de modos trabados para funcionar y utilizando como bombas diodos de baja potencia muy parecidos a los de los reproductores de DVD. Un paso crucial fue optimizar la cavidad del láser para minimizar las pérdidas. Hemos puesto en marcha láseres de pulsos ultracortos, alimentados por baterías AA corrientes, que ocupaban un área menor que una



9. LOS PULSOS INTENSOS EVOLUCIONAN bajo la influencia de varios fenómenos durante cada una de sus travesías de la cavidad del láser. Cuando un pulso intenso (*a*) atraviesa un medio de ganancia, el efecto Kerr genera ondas de longitudes de onda más cortas y más largas; la dispersión separa las ondas componentes y alarga el pulso (*b*). Un sistema de prismas (*c*) puede revertir la dispersión y producir un pulso de brevedad óptima, tras muchas idas y vueltas (*d*).

página de este artículo. Un láser diseñado así produce pulsos de 100 femtosegundos a potencias medias de unos 10 miliwatt. El consumo total de energía, un watt, supone un importante avance frente a los 100 kilowatt requeridos por los láseres de colorante de modos trabados que tenían potencias de salida parecidas.

Si no se necesitan dispositivos sintonizables, también pueden generarse pulsos de femtosegundos con pequeños láseres de fibra. Por medio de ganancia los láseres de fibra emplean trozos cortos de fibra óptica dopada. Este tipo de láser proporciona fuentes eficientes y compactas de pulsos de femtosegundos; es ideal para aplicaciones industriales de nuevo cuño. En el IMRA America de Ann Arbor se acaban de lograr potencias de salida medias de más de 10 watt para un láser de fibra de pulsos de femtosegundos.

La última palabra en miniaturización se dirá cuando se disponga de pulsos de femtosegundos directamente a partir de láseres de diodo especiales. De momento, la actual generación de láseres de pulsos ultracortos de estado sólido ya ha pasado de los ensayos de laboratorio a las aplicaciones en el mundo real, arriba mencionadas.

Las mayores potencias

A energías mayores, el pico de intensidad de un pulso ultracorto puede dañar los dispositivos ópticos ordinarios de los láseres al modificar las propiedades del medio o destruirlo incluso. (Se ha propuesto, en este sentido, aplicar los pulsos ultracortos de gran potencia a la descarga de nubes de tormenta ionizando una vía conductora en el aire.) Durante largo tiempo, esos problemas limitaron las intensidades enfocadas de los láseres a unos 10^{15} watt por centímetro cuadrado. Gérard A. Mourou y Donnas Strickland crearon la técnica de “amplificación de trinos de pulsos”, que supera tales dificultades. Los pulsos se extienden por medio de “trinos”, proceso que disminuye su intensidad y permite que los amplifique un medio corriente de ganancia. Los pulsos extendidos y amplificados se recomprimen entonces mediante unas robustas rejillas de difracción en vacío.

Los primeros diseños necesitaban muchas etapas de amplificación y estaban encerrados en imponentes instalaciones experimentales. Hoy tenemos sobre la mesa del laboratorio láseres de terawatt de potencia (10^{12} watt) que producen haces que se enfocan hasta conseguir intensidades altísimas (10^{18} watt por centímetro cuadrado). Con ellos se han creado plasmas que a su vez generan pulsos ultracortos de rayos X blandos coherentes, útiles en microscopía y litografía. En los muy intensos campos eléctricos de estos plasmas, los electrones adquieren un comportamiento relativista, lo que abre nuevos caminos de investigación de la relatividad especial y la mecánica cuántica. Hace poco se ha conseguido la fusión nuclear del deuterio en el foco de un sistema de mesa que proporciona pulsos de 35 femtosegundos con una potencia del orden del terawatt.

Las grandes instalaciones de láseres han conseguido sobre el blanco intensidades de hasta 2×10^{21} watt por centímetro cuadrado y picos de potencia de los pulsos del orden de petawatt (10^{15} watt), mil veces más que la potencia disipada en un relámpago. Por medio de la presión de la radiación y otros fenómenos, láseres así pueden acelerar la materia 10^{22} veces la gravedad terrestre, ¡una aceleración mucho mayor que la que habría cerca de un agujero negro con una masa como la del Sol! Generan temperaturas y presiones parecidas a las reinantes en el interior de las estrellas; con ellos puede estudiarse la dinámica estelar. Operando con intensidades enfocadas de 10^{30} watt por centímetro cuadrado se podrán crear pares de partículas de materia y antimateria. Logros de tal calado harán avanzar las investigaciones de la electrodinámica cuántica, que describe el comportamiento cuántico de las partículas dotadas de carga y el electromagnetismo.

La otra frontera se halla en los pulsos más cortos. La enorme anchura de banda de los pulsos que duran menos de 10 femtosegundos ha servido para medir con precisión frecuencias ópticas. Las frecuencias de los modos de un láser de modos trabados están uniformemente espaciadas, como las púas de un peine. Ese “peine” sirve de patrón para medir frecuencias que es difícil evaluar directamente. Con dicha técnica se han medido las energías de transición atómicas ópticas con una precisión 1000 veces mayor. Este resultado ofrece una forma nueva e independiente de determinar la constante de estructura fina, que determina la intensidad de la fuerza electromagnética.

La duración registrada de los pulsos más cortos que se hayan generado es de 4,5 femtosegundos; se han producido con láseres de Ti:zafiro. Hasta ahora, para entender los pulsos ultracortos se ha venido recurriendo a la teoría según la cual la envolvente del pulso varía de una manera lenta, en comparación con las oscilaciones ópticas de la luz. Los pulsos que duran menos de cinco femtosegundos sólo tienen en su envolvente unos pocos ciclos ópticos; llevan, pues, la teoría a sus límites. Pronto entraremos en un nuevo régimen físico, el de los pulsos con duraciones comparables con un solo ciclo óptico.

El futuro

Los láseres de pulsos ultracortos, al abarcar una gama amplísima de potencias —más de 17 órdenes de magnitud—, auspician el progreso de múltiples aplicaciones industriales y científicas. Con la formación de imágenes de las profundidades de los

tejidos vivos o con las respuestas a las preguntas fundamentales acerca del universo, la más breve de las obras humanas muestra cuán valiosa es. Si gracias a los pulsos de femtosegundos podemos observar procesos moleculares y movimientos de átomos, merced a los pulsos de attosegundos (milésimas de femtosegundos) observaremos directamente los movimientos de los electrones, protones y neutrones, con lo que ello supone para el conocimiento humano.

La ciencia y la técnica ultrarrápidas irán penetrando en nuestras vidas, en particular con el desarrollo de métodos de formación de imágenes biológicas y procedimientos médicos basados en los láseres. Gracias a los láseres deberían también producirse nuevos descubrimientos farmacológicos; pensemos, por ejemplo, en los mecanismos químicos de acción de ciertos fármacos. También les esperan funciones de control coordinado de las corrientes eléctricas en los dispositivos semiconductores y en las redes de comunicaciones ópticas digitales, que operan a un ritmo de femtosegundos.

Cuando se inventó el láser, se dijo que era una solución en busca de un problema. Hoy los láseres lo inundan todo, desde la reproducción de discos compactos hasta las lectoras de código de barras. Desde su aparición a mediados de los años sesenta, los láseres de pulsos ultracortos se embarcaron en una aventura parecida que les ha llevado de lo esotérico a lo práctico. Proporcionan ya la solución más apreciada para una impresionante variedad de tareas del mundo real, y en el futuro mejorarán la calidad de vida y aportarán riqueza a la economía mundial.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ULTRAHIGH-INTENSITY LASERS: PHYSICS OF THE EXTREME ON A TABLETOP. Gérard Mourou, Christopher P. J. Barty y Michael D. Perry, en *Physics Today*, vol. 51, núm. 1, páginas 22-28, enero de 1998.

ULTRASHORT LIGHT PULSES: LIFE IN THE FAST LANE. Henry Kapteyn y Margaret Murnane, en *Physics World*, vol. 12, núm. 1, páginas 31-35; enero de 1999.

TERAHERTZ IMAGING COMES INTO VIEW. Don Arnone, Craig Ciesla y Michael Pepper en *Physics World*, vol. 13, núm. 4, páginas 35-40, abril de 2000.

Vacunas comestibles

Algún día los niños se inmunizarán masticando patatas o plátanos modificados, sin miedo al pinchazo. Y lo que encierra mayor alcance, las vacunas comestibles evitarán que sigan muriendo millones de personas por falta de acceso a los inmunizantes tradicionales

William H. R. Langridge

Las vacunas han hecho milagros en la lucha contra las enfermedades infecciosas. La viruela ha pasado al arcón de la historia, sino que correrá pronto la poliomielitis. A finales de los años noventa, la campaña internacional emprendida para inmunizar a todos los niños contra seis enfermedades devastadoras consiguió llegar hasta el 80 por ciento (a mediados de los setenta apenas si abarcó el 5 por ciento) y empezó a reducirse la tasa de mortalidad de esas infecciones hasta unos tres millones.

Pero esos éxitos enmascaran graves desproporciones en el reparto. Un 20 por ciento de los niños persiste todavía privado de las seis vacunas —contra difteria, tos ferina, poliomielitis, sarampión, tétanos y tuberculosis—, lo que supone unos dos millones de muertes cada año, sobre todo en las regiones más remotas y pobres del globo. Guerras y revoluciones en muchos países subdesarrollados ponen en peligro los avances recientes obtenidos. Millones de personas mueren de infecciones, porque carecen de inmunización, ésta es poco fiable o no pueden sufragarla.

La situación es preocupante. No sólo donde se sufre tales carencias. En el mundo entero. Las regiones donde se refugian infecciones que ya desaparecieron de otros lugares vienen a ser auténticas bombas de relojería. Cuando los desastres ambientales o sociales socavan los sistemas sanitarios, o desplazan comunidades enteras —provocando el contacto entre portadores y gente con bajas defensas— las infecciones que ya habían desaparecido hacía tiempo tornan a florecer. Por si fuera poco, la internacionalización de los viajes al extranjero y del comercio facilita que las enfermedades aparecidas en una zona pasen de un salto a otro continente. Mientras todo el mundo no cuente con un acceso fácil a las vacunas, nadie podrá sentirse a salvo.

A comienzos de los años noventa, Charles J. Arntzen, a la sazón en la Universidad A&M de Texas, intuyó cómo resolver muchos de los problemas que obstaculizaban la llegada de las vacunas a los niños de los países en vías de desarrollo. Se había pronunciado ya el llamamiento de la Organización Mundial de la Salud en busca de vacunas orales y baratas que no ne-



1. ENTRE LOS ALIMENTOS que se están investigando como opción alternativa a las vacunas inyectables se enumeran los plátanos, las patatas, los tomates, la lechuga, el arroz, el trigo, la soja y el maíz.



2. PLATANOS Y TOMATES cultivados en el Instituto Boyce Thompson de Investigación Vegetal adscrito a la Universidad de Cornell, modificados genéticamente para producir vacunas. Los plátanos encierran especial atractivo para portar vacunas, porque medran en los países en vías de desarrollo, se comen crudos y son la delicia de los niños.



cesitaran refrigeración, cuando Arntzen, de visita en Bangkok, observó a una madre que acallaba con un plátano el llanto del hijo. Los biólogos vegetales habían, asimismo, diseñado métodos para introducir genes seleccionados (los planos de las proteínas) en plantas y lograr, por ende, que la especie modificada, o "transgénica", sintetizara las proteínas cifradas. ¿Por qué, pensó Arntzen, no podría el fruto, susceptible de modificación por ingeniería genética, servir para portar vacunas en sus partes comestibles, que se ingerirían cuando la inoculación fuera necesaria?

Las ventajas serían enormes. Las plantas y los árboles podrían cultivarse *in situ*, sin excesivo coste, con los métodos tradicionales del lugar. Y como muchos cultivos se regeneran fácilmente, habría siempre cosecha sin que los campesinos tuvieran que comprar las semillas o las plantas año tras año. Las vacunas cultivadas *in situ* ahorrarían los inconvenientes logísticos y económicos del transporte de las preparaciones tradicionales con su obligada conservación a bajas temperaturas hasta llegar a sus lejanos puntos de distribución. Al tomarse por vía oral, se prescindiría de las jeringuillas, que, costes aparte, constituyen una fuente de infecciones si se contaminan.

El empeño de transformar la intuición de Arntzen en realidad se halla todavía en sus balbuceos. Pero la investigación realizada en los últimos diez años con animales, y algunas pruebas restringidas con personas, levantan una fundada esperanza en torno a la viabilidad de las vacunas comestibles. Parece, asimismo, verosímil que ciertas vacunas comestibles puedan suprimir la autoinmunidad, fenómeno en cuya virtud las defensas del organismo atacan por error los tejidos normales, sin infectar. Entre las enfermedades autoinmunitarias que se podrían prevenir o aliviar se encuentran la diabetes de tipo I (la que suele detectarse en la infancia), la esclerosis múltiple y la artritis reumatoide.

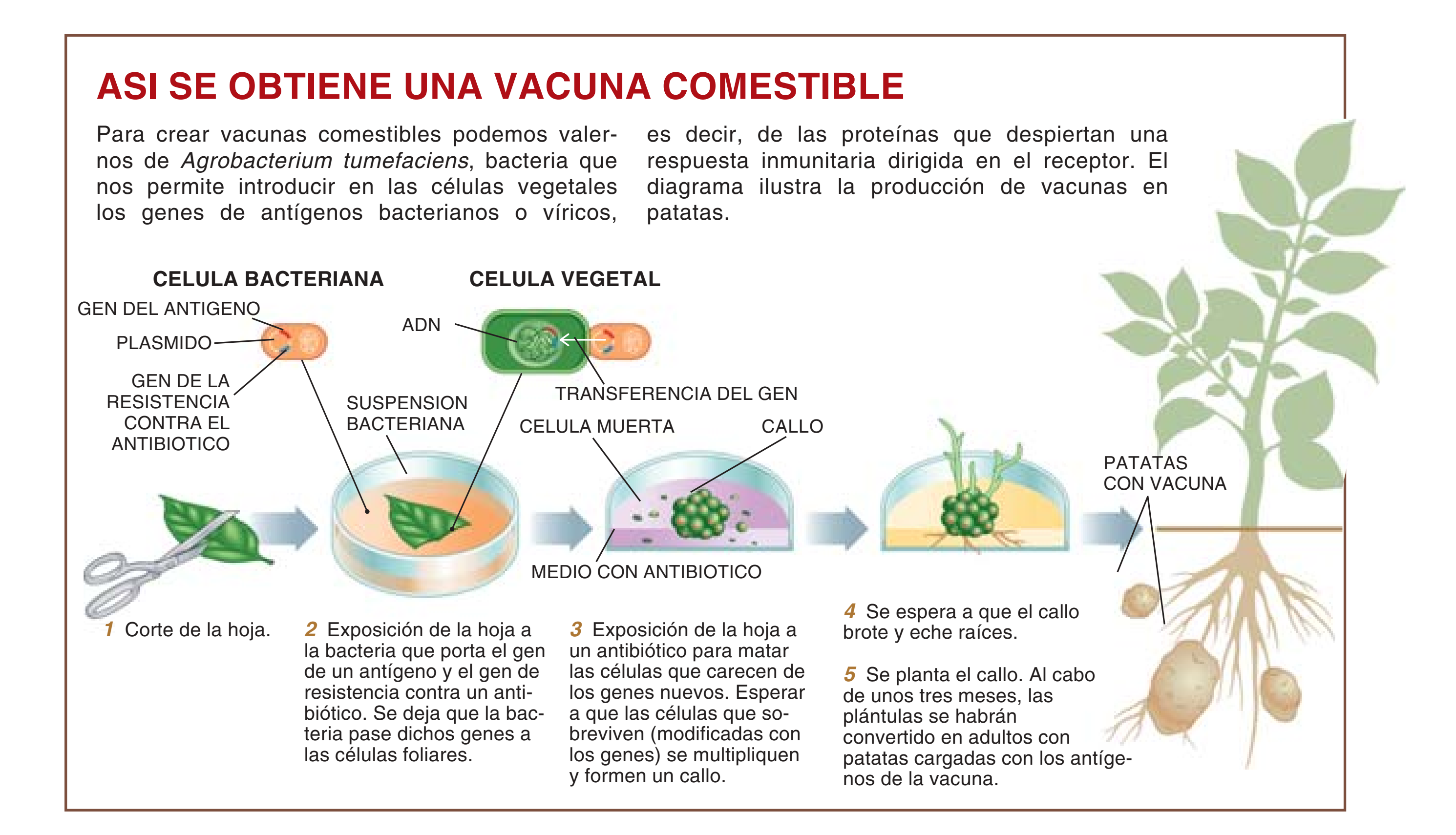
Con cualquier otro nombre

Independientemente de la vía de administración de las vacunas contra las enfermedades infecciosas, todas se proponen cebar el sistema inmunitario para que destruya en seguida los agentes de enfermedad, antes de que se multipliquen y aparezcan los síntomas. Tal acción cumple al sistema inmunitario, puesto en alerta frente a virus o bacterias, muertos o debilitados para limitar su potencia proliferativa.

Al tomar la vacuna por un cuerpo extraño, el sistema inmunitario se comporta como si el organismo sufriera el ataque de un potente agresor. Moviliza toda su fuerza para erradicar y destruir al invasor aparente, dirigiendo su campaña contra los antígenos específicos (proteínas reconocidas como foráneas). La respuesta violenta se apacigua pronto, pero deja centinelas; estas células con "memoria" permanecen alerta, dispuestas a desencadenar ejércitos completos si el patógeno entra en el interior del organismo. Unas vacunas proporcionan una defensa que dura toda la vida; otras, pensemos en las del cólera y el tétanos, deben repetirse de forma periódica.

Las vacunas clásicas presentan su riesgo; aunque pequeño, no deja de ser preocupante. Los microorganismos de la vacuna pueden despertar, provocando la enfermedad contra la que se pretendía defender. Por ese motivo los laboratorios prefieren las preparaciones de subunidades, compuestas fundamentalmente por proteínas antigénicas, separadas de los genes del agente infeccioso. Por sí solas, las proteínas no causan infección. Ocurre, sin embargo, que las vacunas de subunidades son caras (en parte porque se producen en cultivos de bacterias o células animales), hay que purificarlas y deben conservarse refrigeradas.

Las vacunas comestibles se parecen a las preparaciones de subunidades en que se han manipulado para que contengan los antígenos, pero no los genes que posibilitarían la formación del patógeno entero. Hace diez años, Arntzen percibió ya que las vacunas comestibles evidenciarían la seguridad de las preparaciones de subunidades, sin los inconvenientes de costes de purificación y refrigeración. Pero antes de que él y otros pudieran abordar los efectos de las vacunas comestibles en las personas, había que despejar numerosas incógnitas. ¿Se lograría transformar las plantas para que portaran genes que produjeran copias funcionales de las proteínas especificadas? Cuando las plantas comestibles se administraran a los animales de experimentación, ¿se degradarían los antígenos en el estómago antes de ejercer el efecto buscado? (Para evitar precisamente dicha degradación, se administran por vía parenteral las vacunas habituales de subunidades.) Si los antígenos superaran ese obstáculo, ¿atraerían la atención del sistema inmunitario? ¿Sería la respuesta lo suficientemente potente como



ASI SE OBTIENE UNA VACUNA COMESTIBLE

Para crear vacunas comestibles podemos valernos de *Agrobacterium tumefaciens*, bacteria que nos permite introducir en las células vegetales los genes de antígenos bacterianos o víricos, es decir, de las proteínas que despiertan una respuesta inmunitaria dirigida en el receptor. El diagrama ilustra la producción de vacunas en patatas.

1 Corte de la hoja.

2 Exposición de la hoja a la bacteria que porta el gen de un antígeno y el gen de resistencia contra un antibiótico. Se deja que la bacteria pase dichos genes a las células foliares.

3 Exposición de la hoja a un antibiótico para matar las células que carecen de los genes nuevos. Esperar a que las células que sobreviven (modificadas con los genes) se multipliquen y formen un callo.

4 Se espera a que el callo brote y eche raíces.

5 Se planta el callo. Al cabo de unos tres meses, las plántulas se habrán convertido en adultos con patatas cargadas con los antígenos de la vacuna.

para defender a los animales frente a la infección?

Había que determinar, además, si las vacunas comestibles promoverían la inmunidad mucosal. Acontece que muchos patógenos penetran en el organismo a través de la nariz, boca y otros resquicios. Por eso, las primeras barreras que encuentran se hallan en las membranas mucosas que tapizan las vías respiratorias, el tubo digestivo y el tracto reproductor. Tales membranas constituyen el mayor obstáculo disuasor contra la invasión del patógeno. Si la respuesta inmunitaria mucosal es eficaz, genera anticuerpos secretores, moléculas que se lanzan a las cavidades de esos conductos, neutralizando cualquier agente infeccioso que le salga al paso. Una reacción eficaz activa también una respuesta sistémica; en ella, las células circulantes del sistema inmunitario contribuyen a la destrucción de invasores en lugares remotos.

WILLIAM H. R. LANGRIDGE, investigador reconocido por su labor en el desarrollo de vacunas comestibles contra enfermedades infecciosas y autoinmunitarias, enseña en la facultad de medicina de la Universidad de Loma Linda.

Las vacunas inyectadas orillan las membranas mucosas y apenas estimulan las respuestas inmunitarias de las mucosas. Pero las vacunas comestibles entran en contacto con el revestimiento del tubo digestivo. En teoría, pues, activarían ambos tipos de inmunidad, la mucosal y la sistémica. Doble efecto que contribuiría a mejorar la protección contra muchos microorganismos, incluidos los causantes de la diarrea.

Quienes nos dedicamos a la investigación de las vacunas comestibles concedemos prioridad a las que combaten la diarrea. Tomadas en su conjunto, las causas principales —el virus de Norwalk, rotavirus, *Vibrio cholerae* (agente del cólera) y *Escherichia coli* enterotóxica (una fuente de la toxina productora de la “diarrea del viajero”)— dan cuenta de unos tres millones de muertes de niños al año, sobre todo en los países en vías de desarrollo. Se trata de agentes infecciosos que dañan las células del intestino delgado y provocan un flujo de agua desde la sangre y los tejidos hacia el intestino. Para combatir la deshidratación consiguiente se administran disoluciones de electrolitos por vía intravenosa u oral. Si no se dispone de la terapia de rehidratación puede devenir mortal. No existe aún ninguna vacuna práctica, con amplia distribución en los países en vías de desarrollo, que prevenga dichas enfermedades.

Hacia 1995 quedaba establecido que las plantas podían fabricar antígenos foráneos en las conformaciones adecuadas. El grupo de Arntzen había introducido en plantas del tabaco el gen de una proteína derivada del virus de la hepatitis B y logrado que las plantas sintetizaran la proteína. Cuando inyectaron el antígeno en ratones, se activaron los mismos componentes del sistema inmunitario que entran en acción tras la invasión del virus. (La hepatitis B daña al hígado y puede contribuir al desarrollo de un cáncer hepático.)

Enfoque pluridisciplinar

Pero el objetivo no es la inyección, sino el alimento. A lo largo de los últimos cinco años, los experimentos realizados por Arntzen (quien se trasladó en 1995 al Instituto Boyce Thompson de Investigación Vegetal de la Universidad de Cornell) y por mi grupo en la Universidad de Loma Linda han demostrado que las plantas de tomate o de patata pueden sintetizar antígenos del virus de Norwalk, *E. coli* enterotóxica, *V. cholerae* y virus de la hepatitis B. Además, la alimentación de los animales de experimentación con tubérculos o frutos portadores de antígenos pueden

evocar respuestas inmunitarias sistémicas o de mucosa que los protegen, total o parcialmente, ante la exposición subsiguiente de patógenos reales o, en el caso del *V. cholerae* y *E. coli* enterotóxica, frente a las toxinas microbianas. Las vacunas comestibles les han proporcionado cierta protección frente al virus de la rabia, *Helicobacter pylori* (agente bacteriano de la úlcera de estómago), y el virus entérico del visón (que no afecta al hombre).

No es del todo sorprendente que los antígenos administrados a través de la planta persistan tras su curso por el estómago y alcancen y activen el sistema inmunitario. La dura pared externa de las células vegetales sirve al parecer de armadura temporal para los antígenos, conservándolos más o menos a salvo de las secreciones gástricas. Cuando esa pared termina por romperse en el intestino, las células liberan gradualmente su cargamento de antígenos.

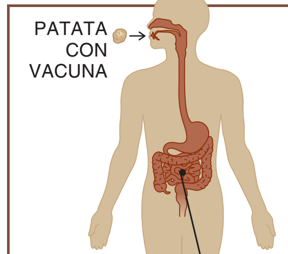
La cuestión clave estriba, por supuesto, en la viabilidad de las vacunas comestibles para el hombre. Han empezado ya los ensayos clínicos. Y, pese a la fase preliminar en que se hallan, el grupo de Arntzen ha obtenido resultados prometedores en una primera prueba con una docena de individuos. En 1997 los voluntarios que ingirieron trozos de patatas crudas peladas, que contenían un segmento benigno de la toxina de *E. coli* (la subunidad B), presentaron respuestas inmunitarias mucosales y sistémicas. Desde entonces, ese equipo ha observado reactividad inmunitaria en 19 de 20 personas que comieron patata con vacuna contra el virus de Norwalk. En el mismo sentido, Hilary Koprowski, de la Universidad Thomas Jefferson, administró a tres voluntarios lechuga transgénica con un antígeno de hepatitis B; dos presentaron una buena respuesta sistémica. Si las vacunas comestibles pueden realmente proteger al hombre contra las infecciones es, sin embargo, una cuestión todavía por determinar.

Camino por recorrer

En resumen, los estudios realizados en animales y personas proporcionan una prueba de principio. Respaldan la estrategia. Pero quedan muchas cuestiones pendientes que deben abordarse. La primera: la escasa cantidad de vacuna que una planta produce. Puede incrementarse dicha producción de varias maneras; por ejemplo, ligando los genes de antígenos con elementos reguladores que aviven la actividad de los genes. Resuelto ese problema, habrá que establecer qué cantidad de alimento con vacuna comestible proporciona una dosis predecible de antígeno.

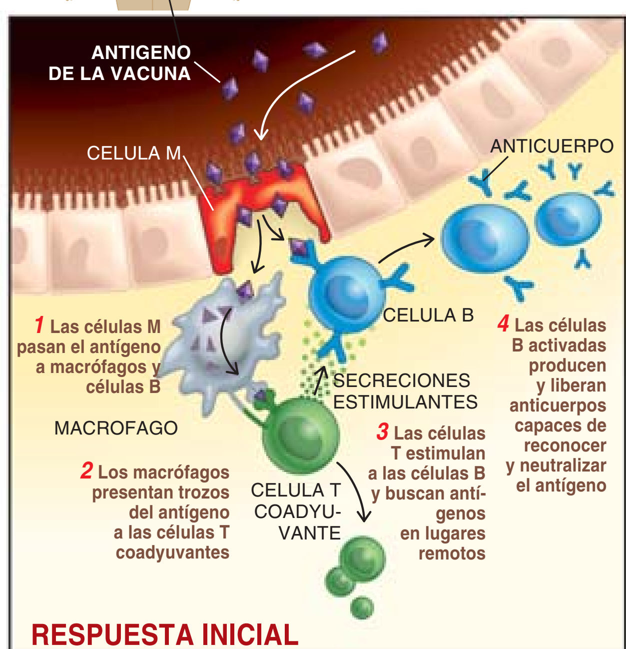
En segundo lugar, tendría que potenciarse la posibilidad de que los antígenos activaran el sistema inmunitario sin que se degradaran antes en el organismo. El uso de estimuladores generales (adyuvantes) y una mejor dirección de la selectividad para el sistema inmunitario podrían compensar en parte una producción baja de antígenos.

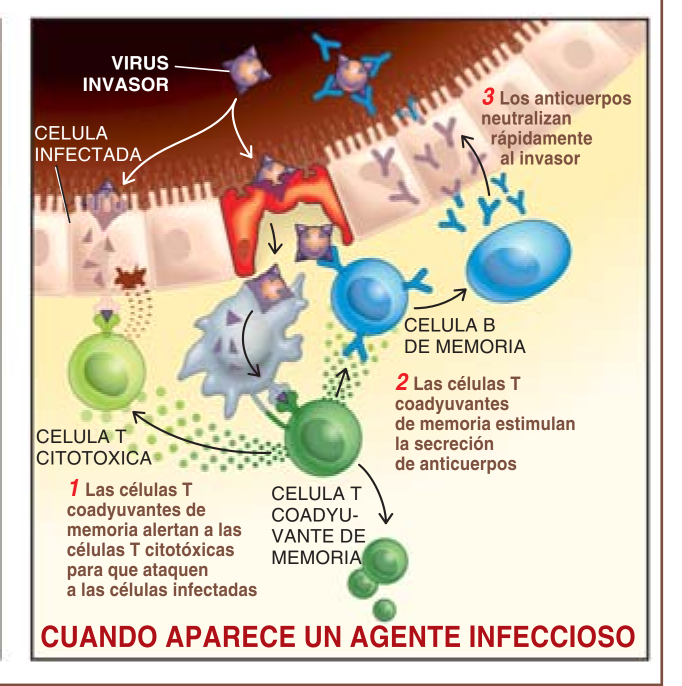
Una de las estrategias para incrementar la selectividad implica la unión de los antígenos a moléculas que se engarcen bien en las células M, componentes del sistema inmunitario que se encuentran en el forro interno del intestino. Las células M captan muestras de materiales que han entrado en el intestino delgado (incluidos los



ASI PROTEGEN LAS VACUNAS COMESTIBLES

Las células M del intestino (*abajo, a la izquierda*) absorben el antígeno de la vacuna comestible y lo pasan a células del sistema inmunitario, que lanza entonces un ataque defensivo, cual si el antígeno constituyera un agente infeccioso real, y no sólo un fragmento. Esa respuesta deja células con "memoria" permanente, capaces de neutralizar cualquier agente infeccioso real que intentara una invasión (*derecha*)





agentes infecciosos) y las pasan a otras células del sistema inmunitario, como las células presentadoras de antígeno. Los macrófagos y otras células presentadoras de antígenos trituran las adquisiciones de ese tipo y exponen los fragmentos proteicos sobre la superficie celular. Si los leucocitos de la sangre llamados linfocitos T coadyuvantes reconocen los fragmentos como extraños, promueven que los linfocitos B (células B) segreguen anticuerpos neutralizantes y contribuyen a iniciar un ataque más amplio sobre el enemigo descubierto.

Resulta que un segmento inocuo de la toxina de *V. cholerae* —la subunidad B— se une con facilidad a una molécula sobre las células M y conduce el material foráneo hasta el interior de tales células. Mediante fusión de antígenos procedentes de otros patógenos con esta subunidad, podría mejorarse la ingesta de antígenos por las células M y potenciar la respuesta inmunitaria frente a los antígenos añadidos. La subunidad B tiende también a asociarse con copias de sí misma, formando un anillo de cinco miembros con un agujero en el centro de la rosquilla. Ante tales fenómenos, se abre la puerta a la esperanza de producir una vacuna que lleve, de una vez, un grupo de antígenos diversos a las células M; se daría así cumplimiento a la apremiante necesidad de proteger simultáneamente, con una sola vacuna, contra múltiples enfermedades.

La investigación trabaja también en otros frentes. Las plantas muestran, a veces, un crecimiento pobre cuando se les exige producir grandes cantidades de una proteína foránea. Problema que se acabaría si se lograra equipar a las plantas con elementos reguladores que indujeran la activación de los genes de antígenos —es decir, sintetizar los antígenos codificados— en el instante deseado (una vez que el vegetal esté cerca de su maduración o quede expuesta a alguna molécula activadora externa) o en las partes comestibles. Se avanza en ese terreno.

Por si fuera poco, cada tipo de planta presenta sus propios problemas. Las patatas son ideales por muchas razones; se multiplican fácilmente y soportan un prolongado almacenamiento sin refrigeración. Pero el tubérculo debe cocinarse para despertar el apetito, calentamiento que puede desnaturalizar las proteínas. Por eso, ni las patatas ni las plantas de tabaco se consideraron en un comienzo vehículos útiles de vacunas; se estudiaron por la comodidad de su manipulación. Pero hay ciertas variedades de patata que se comen crudas en América del Sur. También, y en contra de lo que se podría predecir, la culinaria no siempre destruye el complemento total de antígenos. Las patatas podrían encerrar, pues, unas posibilidades prácticas superiores a las que cabría suponer.

Los plátanos no necesitan transformación culinaria. Abundan, además, en los países en vías de desarrollo. Pero tardan unos cuantos años en madurar, con degradación inmediata del fruto maduro. Se pudren también muy pronto los tomates, cultivados por doquier, aunque crecen más deprisa. El secado y otros métodos económicos de conservación de alimentos ayudan a vencer la descomposición. Entran

La batalla contra la desnutrición

No sólo progresa la investigación sobre las vacunas comestibles; también sigue adelante la búsqueda de alimentos más nutritivos. Famoso a este respecto es el "arroz dorado", con el que se pretende suplir la deficiencia en vitamina A que sufren numerosas zonas de Asia, Africa e Iberoamérica. La carencia produce ceguera y trastornos inmunitarios, que contribuyen a la muerte de más de un millón de niños cada año.

El arroz constituye un medio óptimo para aportar la vitamina requerida. No se olvide que esa gramínea alimenta a un tercio o más de la población mundial. Pero las variedades naturales carecen de vitamina A. El arroz dorado, sin embargo, modificado genéticamente, sintetiza beta-caroteno, un pigmento que el organismo convierte en vitamina A.

El equipo dirigido por Ingo Potrykus, del Instituto Federal Suizo de Técnica, y Peter Beyer, de la Universidad alemana de Friburgo, dio a conocer sus éxitos el pasado enero en *Science*. En mayo una empresa con intereses en los productos agrícolas —Zeneca— compró los derechos y acordó permitir que se donase el arroz a las instituciones que introdujeran los beta-carotenos en especies de arroz populares en zonas deprimidas y distribuyeran los productos resultantes entre los agricultores, sin cargo alguno. (Zeneca espera sacar beneficios de las ventas del arroz mejorado a los países ricos donde es probable que interesen las propiedades antioxidantes del beta-caroteno.)

EL "ARROZ DORADO" contiene beta-caroteno, que confiere color y propiedades nutritivas al grano.

Pero el arroz dorado no está todavía listo para su comercialización. Quedan pendientes muchas pruebas, incluidos los análisis para comprobar si el organismo humano absorbe bien el beta-caroteno de la planta. Se espera que las pruebas duren, por lo menos, hasta el año 2003.

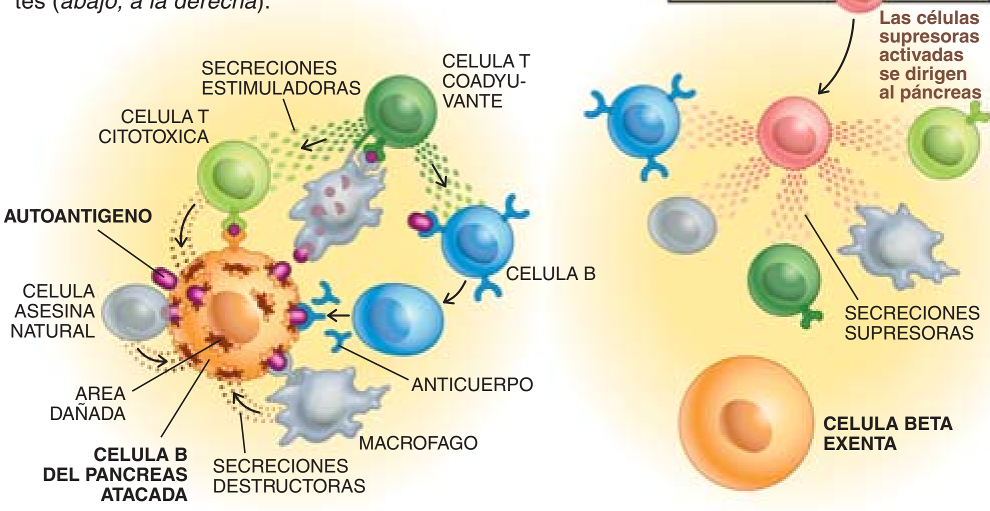
Mientras tanto, se intenta enriquecer el arroz con una abundancia mayor de beta-caroteno y con otras vitaminas y minerales. El año pasado Potrykus anunció el éxito conseguido con el hierro. Más de 2000 millones de personas padecen déficit de hierro.

Se investiga también en el refuerzo de otros alimentos. En junio, por ejemplo, se informó de la creación de un tomate que contiene un gen capaz de triplicar la cantidad de betacaroteno habitual. No se minusvaloran los métodos tradicionales de cultivo; hay un proyecto internacional centrado en el incremento del contenido de vitaminas y minerales en el arroz y en otros cuatro vegetales, el trigo, maíz, alubias y mandioca.

—Ricki Rusting, de la redacción

FRENO A LA AUTOINMUNIDAD

La reacción autoinmunitaria responsable de la diabetes de tipo I aparece cuando el sistema inmunitario confunde las proteínas sintetizadas por las células beta del páncreas (productoras de insulina) con invasores foráneos. El ataque resultante, dirigido a las proteínas lesivas, o “autoantígenos”, destruye las células beta (*abajo, a la izquierda*). Por razones desconocidas, la ingestión de pequeñas cantidades de autoantígenos aquieta el proceso en el ratón diabético. Los autoantígenos podrían actuar en parte despertando células “supresoras” del sistema inmunitario (*recuadro*), que bloquean entonces las actividades destructivas de sus parientes (*abajo, a la derecha*).



en consideración, amén de los citados, las lechugas, zanahorias, cacahuetes, arroz, trigo, maíz y soja.

Importa, asimismo, asegurar que las vacunas que deben potenciar la respuesta inmunitaria no inviertan el sentido de su acción y supriman la inmunidad. A tenor de lo que nos ha demostrado la investigación sobre la tolerancia oral, la ingestión de ciertas proteínas puede provocar que el organismo bloquee su respuesta a las mismas. Para determinar las dosis seguras y eficaces y el calendario de la administración de las vacunas comestibles, la industria necesita mejorar sus instrumentos de manipulación que influyan sobre la acción del antígeno suministrado y saber si estimulará o bloqueará la inmunidad.

Un punto final digno de estudio concierne a la posibilidad de que las vacunas ingeridas por la madre protejan indirectamente a los hijos. En teoría, una madre podría comer un plátano o dos y disparar así la producción de anticuerpos que pasarían al feto a través de la placenta o al recién nacido durante la lactación.

Hay otros retos vinculados a las dificultades técnicas. No abundan los laboratorios farmacéuticos proclives a financiar la investigación de productos dirigidos fundamentalmente a mercados situados fuera de los países ricos. Las organizaciones internacionales de ayuda y algunos gobiernos nacionales e instituciones filantrópicas se esfuerzan en llenar ese vacío, pero el dominio de las vacunas comestibles sigue sin recibir todo el apoyo que necesita.

Además, las vacunas comestibles caen bajo la rúbrica de plantas “modificadas genéticamente”, sometidas a un creciente rechazo popular. A modo de botón de muestra, Axis Genetics, compañía británica que apoyaba los estudios de las vacunas comestibles, acaba de quebrar; uno de sus directivos acusa de ello, en parte, a la inhibición de los inversores en la modificación genética de los alimentos. Cabe, sin embargo, esperar que nuestras vacunas queden fuera de semejante rechazo, toda vez que se trata de salvar vidas y, además, se cultivarán en espacios restringidos (en el caso de que lleguen a traspasar los lindes del invernadero). Igual que otros fármacos estarán sujetas al examen riguroso de los organismos reguladores.

La lucha contra la autoinmunidad

La consideración de uno de los retos aquí expuestos —el peligro de la inducción de tolerancia oral— ha llevado a mi grupo y a otros a la búsqueda de vacunas comestibles que eliminen la autoinmunidad. Aunque el suministro oral de los antígenos derivados de agentes infecciosos estimula a menudo el sistema inmunitario, la ingesta de “autoantígenos” (proteínas procedentes de tejidos sin infectar en un individuo que ha recibido tratamiento) puede en ocasiones suprimir la actividad inmunitaria, fenómeno éste que se observa con frecuencia en los animales de experimentación. Nadie sabe dar razón de esa diferencia.

Algunas de las pruebas de que la ingestión de autoantígenos podría suprimir la autoinmunidad se han obtenido investigando la diabetes de tipo I, resultado de la destrucción autoinmunitaria de las células del páncreas productoras de insulina (células beta). Esa labor destructora progresa calladamente. Andando el tiempo, la pérdida de células beta conduce a una grave deficiencia de insulina, una hormona que se necesita para que las células capten la glucosa de la sangre y obtener así la energía. Por culpa de tal pérdida, suben los niveles de azúcar en sangre. Las inyecciones de insulina ayudan a controlar la diabetes, pero no la curan. Los diabéticos se hallan expuestos a un riesgo elevado de complicaciones graves.

A lo largo de los últimos 15 años se han identificado varias proteínas de la célula beta capaces de despertar autoinmunidad en personas predispuestas a la diabetes de tipo I. Los principales culpables, sin embargo, son la insulina y la ácido glutámico descarboxilasa (AGD), una proteína. Se ha progresado también

en la detección del momento de incubación de la diabetes. El próximo paso a dar será encontrar el camino para detener las bases del proceso antes de que aparezcan los síntomas.

Con ese propósito varios grupos, incluido el mío, han trabajado en vacunas contra la diabetes basadas en plantas que, como la patata, contengan insulina o AGD ligadas a la subunidad B inocua de la toxina del *V. cholerae* (para potenciar la captación de los antígenos por las células M). La administración de las vacunas a una cepa de ratones en los que se había inducido la diabetes contribuyó a suprimir el ataque inmunitario y prevenir o retrasar la elevación del azúcar en sangre.

No se han conseguido todavía plantas transgénicas que produzcan las cantidades de autoantígenos necesarias para una vacuna viable contra la diabetes humana u otras enfermedades autoinmunitarias. Pero se están explorando diversos esquemas prometedores para vencer este y otros retos, igual que se avanza en el terreno de las enfermedades infecciosas.

A las vacunas comestibles para combatir la autoinmunidad y las enfermedades infecciosas les queda un largo camino por delante antes de que estén listas para las pruebas a gran escala con humanos. Los obstáculos técnicos, no obstante, parecen superables. Nada sería más satisfactorio que proteger la salud de millones de niños, ahora indefensos.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

IMMUNOGENICITY IN HUMANS OF A RECOMBINANT BACTERIAL ANTIGEN DELIVERED IN A TRANSGENIC POTATO. C. O. Tacket y cols. en *Nature Medicine*, vol. 4, n.º 5, págs. 607-609; mayo de 1998.

A PLANT-BASED CHOLERA TOXIN B SUBUNIT-INSULIN FUSION PROTEIN PROTECTS AGAINST THE DEVELOPMENT OF AUTOIMMUNE DIABETES. Takeshi Arakawa, Jie Yu, D. K. Chong, John Hough, Paul C. Engen y William H. R. Langridge en *Nature Biotechnology*, vol. 16, n.º 10, páginas. 934-938; octubre de 1998.

PLANT-BASED VACCINES FOR PROTECTION AGAINST INFECTIOUS AND AUTOIMMUNE DISEASES. James E. Carter y William H. R. Langridge en *Critical Reviews in Plant Sciences* (en prensa).

LA VIDA EN LOS FONDOS ANTARTICOS

Las comunidades de suspensívoros bentónicos de los mares antárticos son muy diversas y parecen superar sin problemas el invierno austral. Los autores explican cómo lo logran

Josep-Maria Gili, Covadonga Orejas, Joandomènec Ros, Pablo López y Wolf E. Arntz

La producción de materia orgánica en los océanos está confinada a los primeros metros superficiales, hasta donde penetra la luz solar. Los organismos fotosintetizadores del plancton (término que se aplica a los seres vivos que flotan en la columna de agua), productores primarios del océano, fijan gracias a la energía luminosa el carbono inorgánico disuelto en el agua de mar y lo transforman en moléculas orgánicas sencillas, pilares básicos que les permitirán vivir, crecer y reproducirse.

Los cuerpos unicelulares de los organismos del plancton vegetal, o fitoplancton, suponen, junto con los productos de su actividad biológica, las bacterias y partículas detríticas que provienen de la descomposición de plantas pluricelulares y animales marinos y aun terrestres, la principal fuente de alimento de los organismos heterotróficos. En su conjunto reciben el nombre colectivo de seston.

Las partículas orgánicas procedentes de la degradación de la materia orgánica y los organismos unicelulares del plancton constituyen el componente principal del seston. Este suministra alimento a los consumidores primarios y sirve de sustrato a bacterias y otros microorganismos.

Las características físicas del medio, la viscosidad en especial, permiten que el seston permanezca en suspensión o, lo que es lo mismo, que su caída pasiva a lo largo de la columna de agua sea muy lenta. Ese entorno físico ha instado el desarrollo de una estrategia trófica y un nicho ecológico singulares, inexistentes en los ecosistemas terrestres y sólo parcialmente adoptados en los dulceacuícolas: los suspensívoros.

Los organismos suspensívoros (etimológicamente, que comen partículas en suspensión en el agua) son muy frecuentes en los ecosistemas marinos, lo mismo en el plancton que en el bentos, término genérico que designa a los organismos que viven sobre el fondo.

Muchos suspensívoros bentónicos se hallan fijados al sustrato. Son sésiles. Ante una situación tan pasiva con respecto a la fuente de alimento pudiera pensarse que escasearían. Nada más alejado de la realidad. Los suspensívoros sésiles abundan, hasta el punto de representar más del 50 % de la biomasa de muchas comunidades litorales y de las situadas sobre la plataforma continental.

Las poblaciones de suspensívoros bentónicos dependen del alimento disponible en la capa de agua que les circunda y de las corrientes que desplazan y renuevan di-





cha capa. Su eficacia filtradora se ha puesto de manifiesto a través de distintos trabajos experimentales llevados a cabo en aguas someras. A este propósito, el equipo de H. U. Riisgård, de la Universidad de Odense, ha evaluado el impacto de los suspensívoros en la extracción total del fitoplancton; lo cifra en 1 a 10 m^3 de agua por m^2 de fondo y día, volumen que puede multiplicar varias veces el de la masa de agua que les rodea. En otros casos, como en poblaciones de bivalvos de un estuario de las costas pacíficas de Norteamérica, se observó una tasa de filtración que correspondía al total de la producción primaria diaria de la columna de agua.

El hecho más destacado de esta presión depredadora sobre las comunidades planctónicas se ha observado recientemente en estudios realizados en el Mediterráneo por investigadores del Instituto de Ciencias del Mar de Barcelona (CSIC) y del Departamento de Ecología de la Universidad de Barcelona. Se ha demostrado que la presión depredadora de los suspensívoros bentónicos se ejerce desde el picoplancton (partículas planctónicas cuyo tamaño oscila entre 0,2 y 2,0 micrometros) y el nanoplancton (2,0-20 micrometros) hasta el zooplancton (en el rango de los milímetros). Por dar un ejemplo, se calcula que una especie de hidrozoo cuyo tamaño de pólipo no supera los 300 μm, captura más de 10.100 organismos del zooplancton por metro cuadrado y día.

Ante semejante capacidad mostrada por los organismos suspensívoros de detraer gran número de partículas y organismos de las comunidades suspendidas en la masa de agua, los ecólogos comenzaron a pensar que su papel en los procesos de transferencia de materia y energía en los ecosistemas marinos debía ser mucho más importante de lo que se venía concediendo.

Modelo tradicional

Se acometieron varios estudios sobre la función de las comunidades de suspensívoros en mares templados (el Mediterráneo) y en mares tropicales. Pero no se abordó esa misión en mares fríos, por las dificultades logísticas y de acceso a las regiones polares.

A mediados de los años setenta, el equipo de P. Dayton, de la Institución Scripps de Oceanografía en La Jolla, y posteriormente otros grupos, dieron cuenta de la cuantiosa abundancia de suspensívoros en las comunidades bentónicas de la bahía antártica de McMurdo. No sólo eso. Demostraron también la importancia del sistema de corrientes marinas y de los procesos de sedimentación y transporte de materia orgánica para explicar la distribución y localización de las comunidades de suspensívoros. Este acoplamiento entre los procesos de transporte vertical y distribución espacial de las mayores concentraciones de biomasa bentónica concordaba con el modelo aceptado de funcionamiento del océano Antártico.

Durante la primavera y verano australes se producen los grandes máximos de producción planctónica. Son consecuencia directa del aporte de nutrientes procedentes del deshielo y del incremento de la intensidad luminosa, que en latitudes altas pasa de ser prácticamente nula durante el invierno a durar casi las 24 horas del día en primavera.

A estas floraciones de productores primarios suceden las de consumidores primarios: zooplancton herbívoro, como el *krill*. En muchos casos, los consumidores no agotan la producción primaria, generada en poco tiempo y a gran escala. La fracción no aprovechada sedimenta hacia el fondo. Ese flujo vertical constituye, creíase, la fuente primordial de alimento, si no la única, para las comunidades de suspensívoros antárticos. Una vez terminado el verano y durante el prolongado invierno austral, la oscuridad y la escasez de nutrientes frenan la producción planctónica y, por ende, cortan el suministro vertical de alimento.

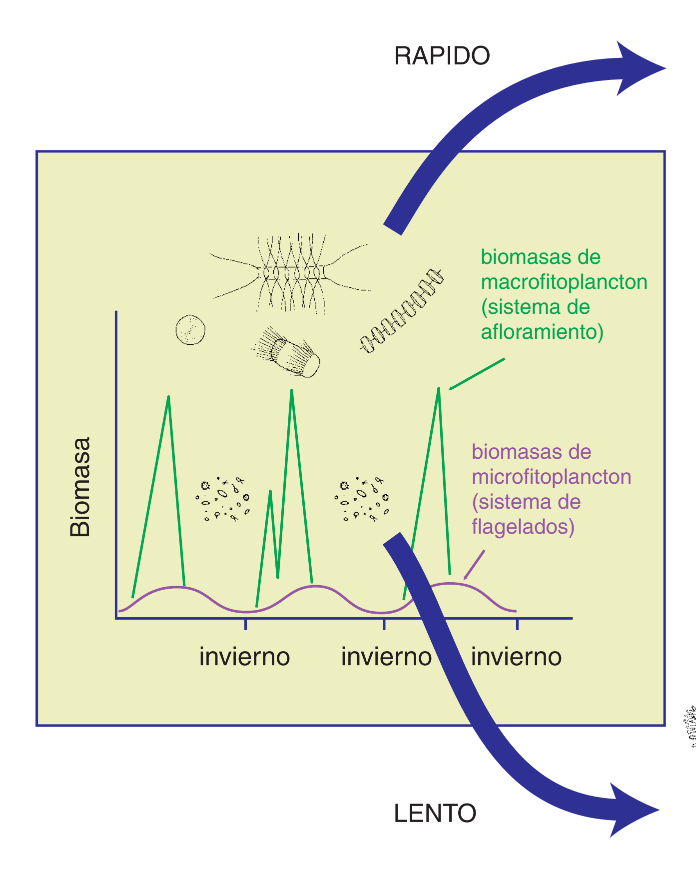
Al mismo tiempo, parece ser que las comunidades planctónicas situadas en las capas superficiales retienen con suma eficacia las pérdidas por sedimentación y reciclan buena parte de la materia orgánica generada. Tal opina, entre otros planctonólogos, V. Smetacek, del Instituto Alfred Wegener de Investigación Polar y Marina en Bremerhaven (AWI); si así fuera, la posibilidad de llegada de alimento a los fondos marinos antárticos se vería muy reducida.

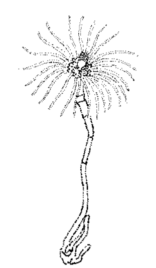
Este modelo general de flujo vertical escaso en el tiempo (nulo en invierno), aunque con algunos episo-

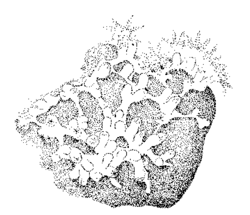
1. FAUNA, RICA Y DIVERSA, de suspensívoros de los fondos litorales del mar de Weddell, situados entre los 200 y los 400 metros de profundidad. Esponjas, cnidarios, briozoos, tunicados, equinodermos y animales de otros grupos se hallan instalados sobre un fondo fangoso donde abundan las espículas silícicas de esponjas.













2. MODELO ESTACIONAL propuesto por V. Smetacek, Instituto Alfred Wegener de Investigación Polar y Marina en Bremerhaven, para las comunidades planctónicas en la Antártida. Las proliferaciones de autótrofos del verano se intercalan en una concentración mucho menor, aunque casi constante, de pico y nanoplancton, mayoritariamente heterótrofo, durante todo el año. A este modelo temporal se le han acoplado dos tipos distintos de estrategias de los suspensívoros que se alimentan del plancton: los oportunistas y estacionales, como *Tubularia ralphii*, que explotan el microplancton autótrofo y los herbívoros, y los perennes, como *Thouarella variabilis*, que explotan la fracción más fina del plancton. Entre estas dos estrategias extremas se sitúan algunas especies que tienen dietas mixtas y que asimismo muestran otras características biológicas y ecológicas intermedias, como *Clavularia frankliniana*.

dios ocasionales de llegada masiva de partículas y organismos al fondo marino, sólo es compatible con una reducción de la actividad de los organismos bentónicos durante el invierno austral. Por ello se postulaba que tenían una baja tasa de crecimiento y un tiempo de reproducción que, en muchos casos, requería un ciclo mínimo bianual para generar los productos sexuales o producir las larvas.

Cuestiones y paradojas

Pero, ¿qué pasa entonces con las grandes acumulaciones de biomasa excedentarias de la columna de agua? ¿Sedimentan, se acumulan en el fondo y, una vez allí, y debido a la lentitud de los procesos de descomposición bacteriana en aguas por debajo de los 0 ºC, tardan años en retornar al medio? A esa aparente contradicción se le llamó "paradoja antártica".

Las observaciones llevadas a cabo en el mar de Weddell durante los últimos diez años por investigadores del AWI, liderados por W. E. Arntz y J. Gutt, han sacado a la luz la existencia de densas comunidades de suspensívoros bentónicos que ocupan extensiones de kilómetros en las plataformas continentales de ese mar, con concentraciones que superan los 100.000 individuos por metro cuadrado y biomasas que exceden de los 1000 g m^{-2} (en peso húmedo), o 15 g de carbono m^{-2}. Estos valores sitúan a tales comunidades de suspensívoros bentónicos antárticos entre las más ricas y diversas de todos los mares y océanos mundiales.

Dichas comunidades, observadas y analizadas en el mar de Weddell mediante ROV (vehículos submarinos operados a distancia, equipados con cámaras de vídeo y fotográficas), coincidían con las encontradas en McMurdo y en el mar de Ross por otros investigadores. Ello hacía suponer que las comunidades de supensívoros eran mucho más frecuentes y abundantes en los fondos antárticos de lo que se pensaba.

Además, aunque los episodios de producción planctónica estacional y de sedimentación de parte de la misma hacia el fondo fuesen importantes y los organismos aprovecharan este "maná" durante un tiempo limitado, las entradas estacionales no podrían explicar por sí solas la densidad y plétora de organismos bentónicos suspensívoros en el océano Antártico. Por otro lado, la información recabada sobre el impacto de la alimentación de los suspensívoros en otras regiones del globo, ya mencionada, inducía a dudar de los planteamientos aceptados para esta región polar.

Esa sugestiva gavilla de cuestiones y contradicciones despertó el interés de investigadores de varios países por aclarar el misterio de los suspensívoros antárticos. Por ello, cuando en 1994 se decidió llevar a cabo el programa internacional Ecología de la zona de hielo del Antártico (EASIZ), auspiciado por el Comité Científico para la Investigación Antártica (SCAR), uno de los objetivos prioritarios que se plantearon fue desentrañar el papel de las comunidades de suspensívoros antárticos.

Se trazó una línea de actuación común entre el Servicio Británico de Inspección Antártica (BAS), con sede en Cambridge, y el AWI. El BAS, dirigido por A. Clarke, se centró en las zonas litorales de las islas subantárticas y la península Antártica; el AWI, bajo la dirección de W. E. Arntz, realizó cuatro campañas de investigación a bordo del buque oceanográfico *Polarstern* en el mar de Weddell en los últimos seis años.

Un modelo nuevo

Los estudios efectuados en el marco del programa EASIZ por investigadores del Instituto de Ciencias del Mar (CSIC) de Barcelona, del Departamento de Ecología de la Universidad de Barcelona y del Laboratorio de Biología Marina de la Universidad de Sevilla, conjuntamente con los distintos equipos del AWI, han permitido avanzar hacia un modelo de funcionamiento nuevo de los ecosistemas marinos antárticos.

El nuevo modelo viene respaldado por experimentos y observaciones en comunidades de suspensívoros bentónicos de otras áreas del mundo, cuyo comportamiento y ecología admiten una generalización a escala global. Muchos de los resultados obtenidos en el mar de Weddell a bordo del B/O *Polarstern* se han corroborado y completado con los estudios del BAS en la isla Signy y en los alrededores de la base antártica de Rothera, instalada en el litoral del mar de Bellingshausen.

Una de las primeras observaciones que acabaron con ideas preconcebidas sobre la dinámica de los ecosistemas antárticos fue que la mayoría de los suspensívoros bentónicos litorales estudiados en la isla Signy permanecían activos a lo largo del año. Esas investigaciones, llevadas a cabo por el equipo de Clarke, contrastan con la tesis arraigada de que en los mares polares los organismos debían reducir su actividad invernal al mínimo ante la falta de alimento.

Ahora bien, si los animales suspensívoros permanecen con sus estructuras filtradoras activas es porque pueden alimentarse. El coste metabólico de mantenerse activos dobla, por lo menos, el coste que requiere reducir el metabolismo al mínimo. En otras regiones se ha comprobado que los ritmos de actividad de los suspensívoros bentónicos están íntimamente ligados a la posibilidad de llegada de alimento. Semejante disponibilidad depende más de la estructura física del mar que de la concentración total de presas potenciales.

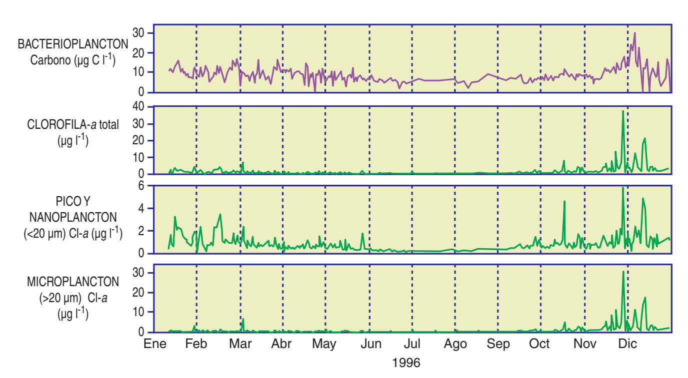
Así, cuando durante el verano en el Mediterráneo se produce la estratificación de la columna de agua, la llegada de partículas alimenticias al fondo es muy escasa. En respuesta, los suspensívoros se mantienen la mayor parte del tiempo inactivos; los pólipos o zooides están contraídos o apenas bombean agua.

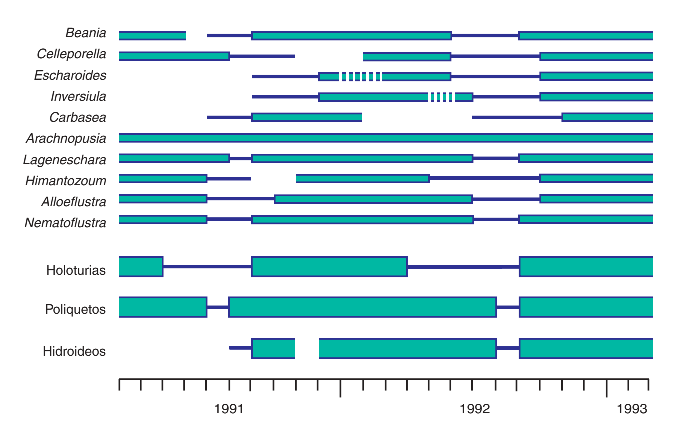
Una situación similar se da en la Antártida cuando la cobertura del hielo es máxima en las zonas menos profundas, hecho que en la isla Signy ocurre tan sólo durante uno o dos meses, según los años. Mantener la actividad durante casi todo el año implica la existencia de una fuente alimentaria distinta de la que se genera en la columna de agua y cae al fondo durante primavera o verano; esa fuente es el microplancton autótrofo.

Al hacer el seguimiento anual de la composición de la comunidad planctónica, los investigadores de la base coreana King Sejong han descubierto que, si durante la primavera y verano australes el plancton está dominado por las explosiones de microplancton (mayoritariamente fitoplancton), el resto del año está dominado por organismos del nano y picoplancton heterótrofo (bacterias, flagelados o ciliados). Este segundo tipo de plancton, muy estable, garantiza la presencia de alimento disponible para las comunidades bentónicas en pleno invierno antártico.

Dinámica del plancton antártico

Si bien la dinámica del plancton en la columna de agua y su relación con las comunidades de suspensívoros bentónicos se están abordando con éxito a escala litoral, queda por determinar si se repite dicha





3. LA INTERPRETACION DE LA DINAMICA de las comunidades planctónicas antárticas en aguas someras ha sufrido un profundo cambio a raíz de los trabajos de S. H. Kang, del Instituto Coreano de Investigación y Desarrollo Oceánicos en Seúl, y A. Clarke, del Servicio Británico de Inspección Antártica en Cambridge. El plancton autotrófico abunda a lo largo del verano austral; en el resto del año las comunidades planctónicas están dominadas por otro tipo de plancton pequeño y en muchos casos heterotrófico, como las bacterias (*arriba*). Esta presencia de alimento potencial en la columna de agua puede explicar que muchos grupos de suspensívoros bentónicos se mantengan activos de un modo casi permanente (*abajo*). En la isla Signy se ha observado que muchos organismos filtradores capturan presas sin solución reseñable de continuidad (*barras gruesas*), permaneciendo inactivos (*líneas continuas*) sólo unos pocos meses por carecer de alimento.

situación en otras áreas antárticas, lejos de la costa y a profundidades notables.

Las zonas costeras escasean en la Antártida. La plataforma de hielo continental “rebosa” por la casi totalidad del perímetro del continente, y ello obliga a que los organismos bentónicos se sitúen por debajo de 50 o más metros de profundidad.

De la composición de las comunidades planctónicas instaladas sobre fondos situados entre 100 y 300 m de profundidad se ocuparon las campañas del B/O *Polarstern* en aguas del mar de Weddell. Esas comunidades presentaban unas concentraciones de bacterias por encima de 10^5 células por mililitro de agua; otros componentes del nano y picoplancton mostraban densidades equiparables a las conocidas en el mar Mediterráneo o incluso el océano Atlántico. Se prospectaron las plataformas continentales del sector oriental del mar de Weddell, donde residen algunas de las comunidades de suspensívoros bentónicos más ricas y diversas de la Antártida.

El que la columna de agua de los mares que rodean la Antártida aporte suficiente alimento potencial en forma de partículas muy pequeñas (bacterioplancton y otros) es una condición necesaria, aunque no suficiente, para la existencia y la actividad continuada de organismos suspensívoros en sus fondos. Hay que demostrar que dichos organismos pueden alimentarse de esta parte del espectro de tamaños del plancton.

La primera prueba surgió a raíz de los resultados obtenidos por investigadores de nuestro equipo en el Mediterráneo y el Caribe, junto con algún otro trabajo en mares tropicales. Demostramos que la “fracción fina” planctónica (nano y picoplancton) constituía un componente decisivo en la dieta natural de los suspensívoros bentónicos.

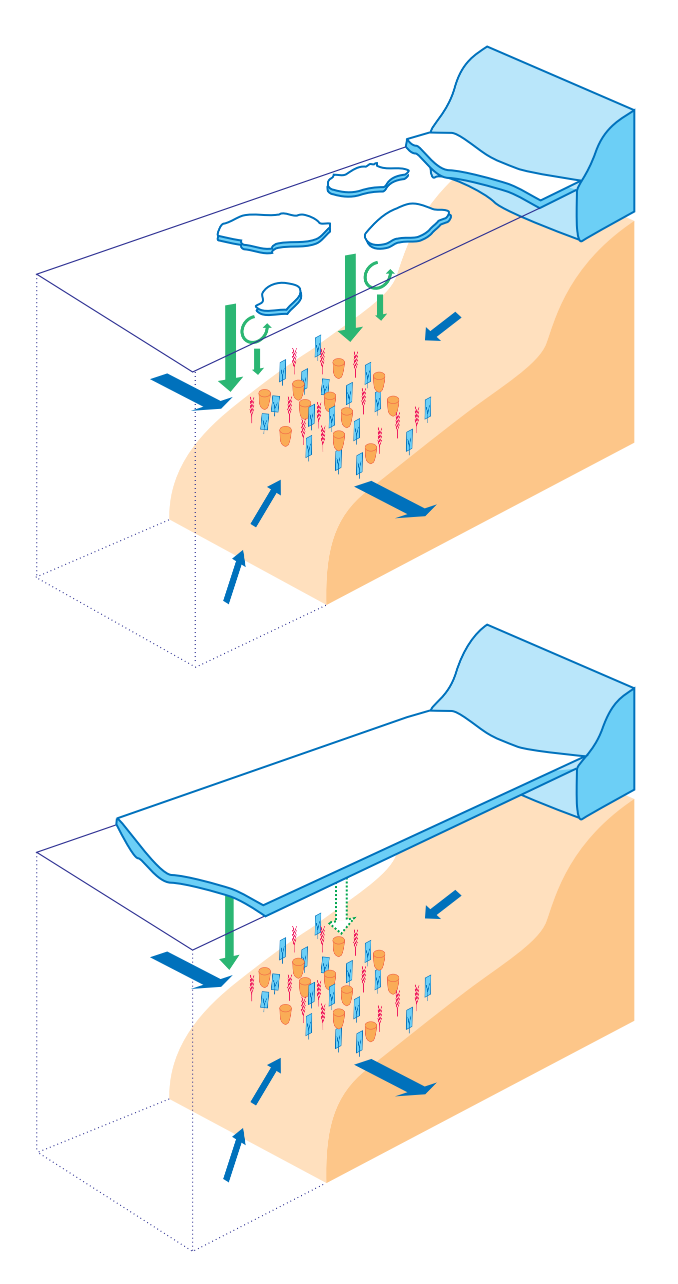
Una segunda prueba la suministraron los experimentos realizados a bordo del B/O *Polarstern* durante la última campaña EASIZ (II), de enero a marzo de 1998. En ella, y en gran medida gracias a disponer de técnicas refinadas y logística adecuada para trabajar en mares polares, se pudo estudiar el tipo y las tasas de alimentación de algunas especies de cnidarios. En concreto, se observó que las colonias del hidrozoo *Oswaldella antarctica* se alimentaban de presas de tamaño comprendido entre 20 y 40 µm, básicamente nanoflagelados, aunque también bacterias y ciliados.

Quedaba así confirmada la importancia de la fracción fina planctónica, incluso en la Antártida, para la alimentación de los suspensívoros bentónicos. Podíamos luego plantear sobre bases sólidas una nueva hipótesis. En efecto, puesto que este plancton pequeño predomina a lo largo del año en la columna de agua, y muy especialmente cerca del fondo, cabía sugerir que los suspensívoros lo aprovecharían incluso durante el invierno. Más aún. Igual que sabíamos de ciertas especies mediterráneas, podíamos esperar que los suspensívoros alternaran su dieta, es decir, aprovecharan en verano las masivas llegadas de microplancton y vivieran de la fracción fina el resto del año.

Confirmación experimental de la hipótesis

Experimentos con trampas de sedimento realizados en zonas poco profundas del mar de Bellingshausen han corroborado la llegada al fondo de pico y nanoplancton. Sin embargo, no hay que descartar *a priori* otras fuentes de alimento que pudieran subvenir durante todo el año las necesidades metabólicas de las comunidades bentónicas.

Una fuente posible en zonas relativamente someras son las comunidades fitoplanctónicas y otras heterotróficas que resisten durante todo el año en los resquicios del hielo de la banquisa. Al congelarse el agua para formar la extensa banquisa superficial (*pack*), el hielo secuestra nutrientes orgánicos e inorgánicos, que permiten



4. MODELO DE FLUJO Y DE TRANSPORTE de partículas en suspensión en el agua hacia el fondo marino. En verano (*arriba*) el alimento llega al fondo arrastrado por el flujo vertical de microplancton autotrófico (fitoplancton), parte del cual se recicla en la superficie de la columna de agua (*flechas verdes*). En invierno, cabe todavía flujo de microplancton cerca del límite de la banquisa (*flecha verde*). Además, el zooplancton (*flecha blanca*) parece ser otra fuente de alimento para los suspensívoros bentónicos. En las dos estaciones del año austral, los procesos de transporte horizontal (*flechas azules grandes*) que pueden generar también resuspensión, así como los de transporte vertical (*flechas azules pequeñas*), ejercen una función importante en los flujos de materia y energía en esos ecosistemas.

la proliferación de algas y otros microorganismos asociados a la base de la banquisa; unas y otros constituyen, a su vez, la fuente de alimentación de organismos del zooplancton: copépodos y, sobre todo, *krill*. Algunos han sugerido que la comunidad planctónica que reside en la columna de agua durante primavera y verano se concentra debajo del hielo el resto del año.

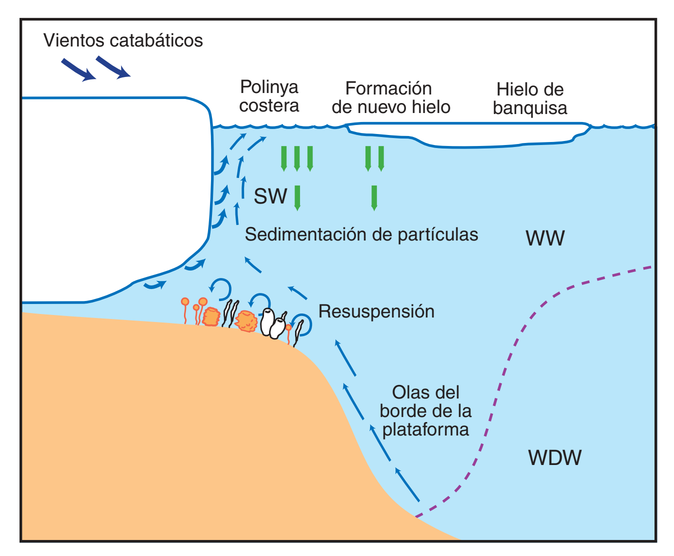
Como resultado de la actividad de estos ramoneadores de las comunidades del hielo, se produce la caída hacia el fondo de sus paquetes fecales que, debido a las bajas temperaturas de la zona, contienen productos poco degradados.

Uno de los aspectos más notables y al mismo tiempo menos estudiado es el posible papel del zooplancton en la nutrición de los suspensívoros sésiles. Sabido es que el zooplancton efectúa extensas migraciones a lo largo de la columna de agua; en los ecosistemas polares estas migraciones van ligadas al ciclo de vida de las especies.

Muchas especies de copépodos alcanzan el estado adulto al inicio de la primavera austral, después de pasar buena parte del invierno en estadio juvenil. Así, por ejemplo, *Stephos longipes* vive durante el otoño y el invierno en las capas profundas, cerca del fondo marino, y migra hacia la superficie justo cuando termina el invierno y empieza el deshielo. Los crustáceos planctónicos acumulan sustancias de reserva durante el verano (en forma de lípidos), que luego les permiten sobrevivir hasta la primavera; pero se ignora qué es lo que hacen cerca del fondo. ¿Alimentarse quizá?

Lo que sí parece evidente es que, cuando el zooplancton se acerca al fondo marino, donde hay grandes extensiones cubiertas de suspensívoros, éstos pueden capturarlos. Se ha observado ese fenómeno durante la reciente campaña antártica EASIZ II (*Polarstern* XV/3), ya que los pólipos de *Anthomastus bathyproctus*, un alcionáceo, estaban llenos de zooides de *Salpa thompsoni*. Esta salpa planctónica efectúa largas migraciones diarias, de más de 200 m, y se acerca mucho al fondo. En la misma campaña se estudió también el comportamiento del hidrozoo *Tubularia ralphii*, cuyas presas eran mayoritariamente copépodos planctónicos. *T. ralphii* presentaba una tasa de captura de zooplancton muy elevada, 15 presas por pólipo y día, tan sólo comparable con la observada en *T. larynx*, común en las zonas más productivas del Atlántico norte.

La captura de presas zooplanctónicas podría representar un beneficio óptimo para suspensívoros sésiles. Aunque esa depredación pueda ser ocasional, el zooplancton concentra gran riqueza energética; un solo episodio de captura puede suponer que el suspensívoro cubra las necesidades metabólicas de una semana o más.



5. MODELO DE CIRCULACION en el sector oriental del mar de Weddell, desarrollado por R. Scharek, del AWI. El contacto y rozamiento entre dos masas de agua (WW y WDW) promueve un sistema de ondas internas, que rompen en el borde de la plataforma continental. Tras circular a lo largo de la plataforma, las ondas generan un sistema de afloramiento en el margen del hielo. La corriente ascendente circula por las plataformas (*flechas azules*) y parece producir constantes procesos de resuspensión que, por un lado, favorecerían la accesibilidad de los organismos suspensívoros al alimento en forma de partículas resuspendidas del fondo, añadidas así a las depositadas desde la columna de agua (*flechas verdes*); y, por otro, promoverían el transporte de nutrientes orgánicos generados por la actividad metabólica de las comunidades de suspensívoros hacia la superficie, en las zonas de *polinyas* o de aguas libres junto a las plataformas de hielo (SW).

En general, los suspensívoros bentónicos son muy plásticos. Pueden capturar presas de un amplio rango de tamaños y de una gran variedad de tipos. Un botón de muestra: *A. bathyproctus* captura desde salpas hasta células de fitoplancton; *Germesia antarctica*, otro alcionáceo, se tiende sobre el fondo y atrapa con sus tentáculos presas sedimentadas.

En ciertas zonas de la Antártida no son fenómenos insólitos la caída invernal de alimento e incluso los flujos verticales de primavera y verano. Esta heterogeneidad espacial en el trasvase de alimento de la columna de agua al fondo constituye uno de los factores que se han barajado para explicar la heterogeneidad del bentos en los fondos marinos.

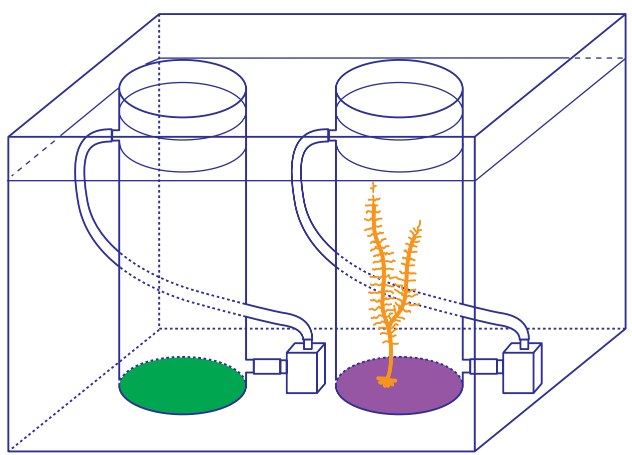
Resuspensión, la clave

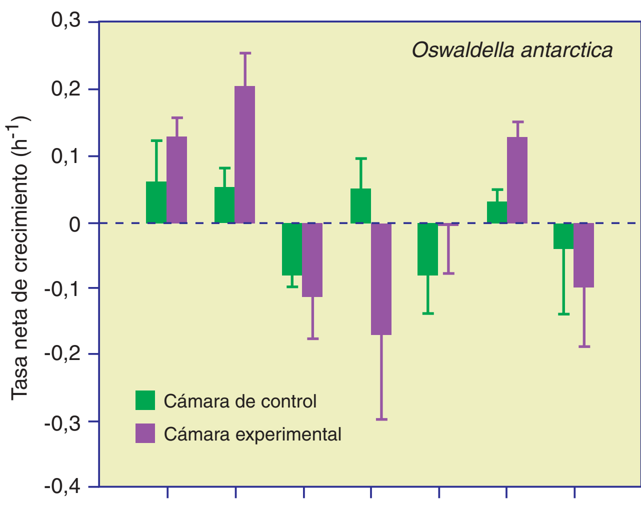
Bastaron unos primeros muestreos de lo que ocurre en las zonas litorales para rebatir la idea de la escasez de alimento, fundada en la creencia de que sólo era asequible en unas pocas zonas de la plataforma continental. Los trabajos realizados por investigadores del AWI y del Instituto Antártico Argentino en la isla del Rey Jorge han demostrado que las diatomeas bentónicas se resuspenden de forma continuada siguiendo un ritmo mareal, dos veces al día.

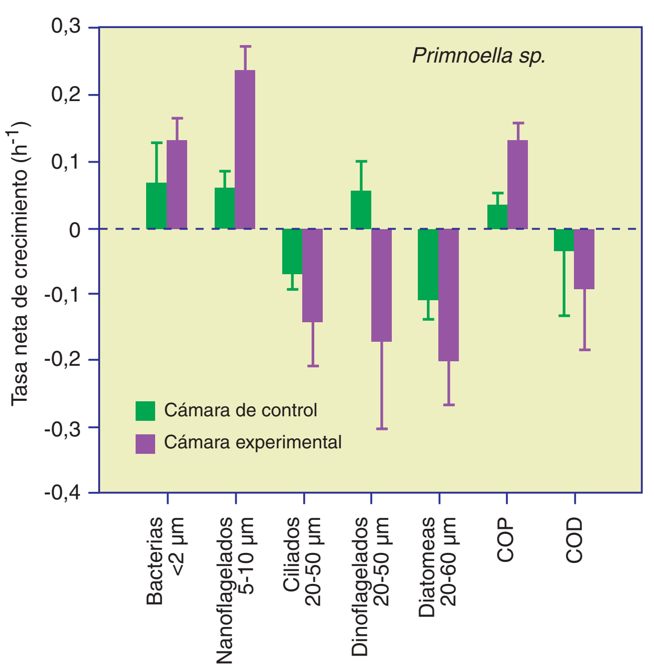
Dichas algas están, pues, disponibles sin apenas solución de continuidad en la columna de agua para los

JOSEP-MARIA GILI, COVADONGA OREJAS, JOAN-DOMÈNEC ROS, PABLO LÓPEZ y WOLF E. ARNTZ forman parte de un grupo de ecología bentónica marina que desde hace un cuarto de siglo investiga diversos aspectos de la estructura y dinámica de las comunidades bentónicas, en el Mediterráneo y en otras regiones oceánicas. Gili es investigador del Instituto de Ciencias del Mar de Barcelona (CSIC); Ros regenta la cátedra de ecología de la Universidad de Barcelona; López enseña zoología en la Universidad de Sevilla; Arntz dirige la división de ecosistemas bentónicos del Instituto Alfred Wegener de Investigación Polar y Marina en Bremerhaven, donde Orejas está terminando la tesis doctoral, codirigida por Arntz y Gili.









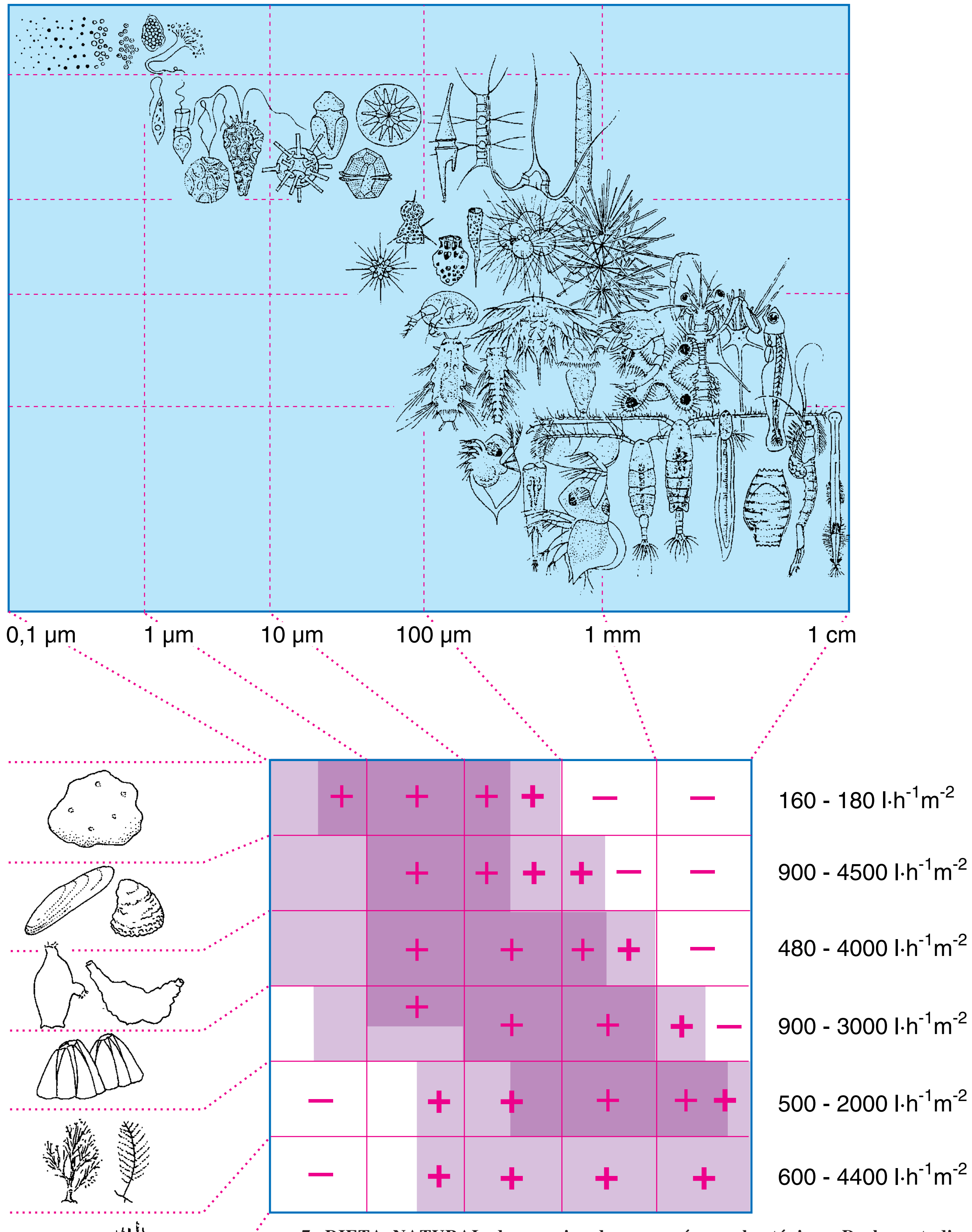
6. ANALISIS DE LA DIETA. Se ilustran los primeros resultados obtenidos por los autores durante la campaña ANT XV/3 1998, a bordo del B/O *Polarstern*, de enero-marzo de 1998, sobre la alimentación de dos especies de suspensívoros bentónicos, el hidrozoo *Oswaldella antarctica* y la gorgonia *Primnoella sp*. En incubaciones efectuadas a bordo, en cámaras frías (*izquierda, arriba; esquema abajo*) experimentales (*violeta*) y de control (*verde*) a lo largo de 24 horas, en las que se medía la variación (aumento o disminución) de las diversas fracciones del plancton (bacterias, nanoflagelados, ciliados, dinoflagelados, diatomeas) y del carbono orgánico particulado y disuelto en el agua, se ha demostrado la importancia de los organismos planctónicos en la dieta de los cnidarios. Los suspensívoros depredan ciliados, dinoflagelados y diatomeas (*barras de la parte inferior de ambos gráficos*); la reducción de los dos primeros grupos, depredadores de bacterias y nanoflagelados, desata el crecimiento de estas fracciones (*barras de la parte superior de ambos gráficos*), con la mengua consiguiente de materia orgánica disuelta, dieta de dichos microorganismos.

suspensívoros. Al mismo tiempo el agua las arrastra a decenas de metros de su localización original. Lo comprobamos nosotros a través del examen del contenido estomacal del hidrozoo *Silicularia rosea* en Rey Jorge; el 90 % de su dieta eran diatomeas bentónicas.

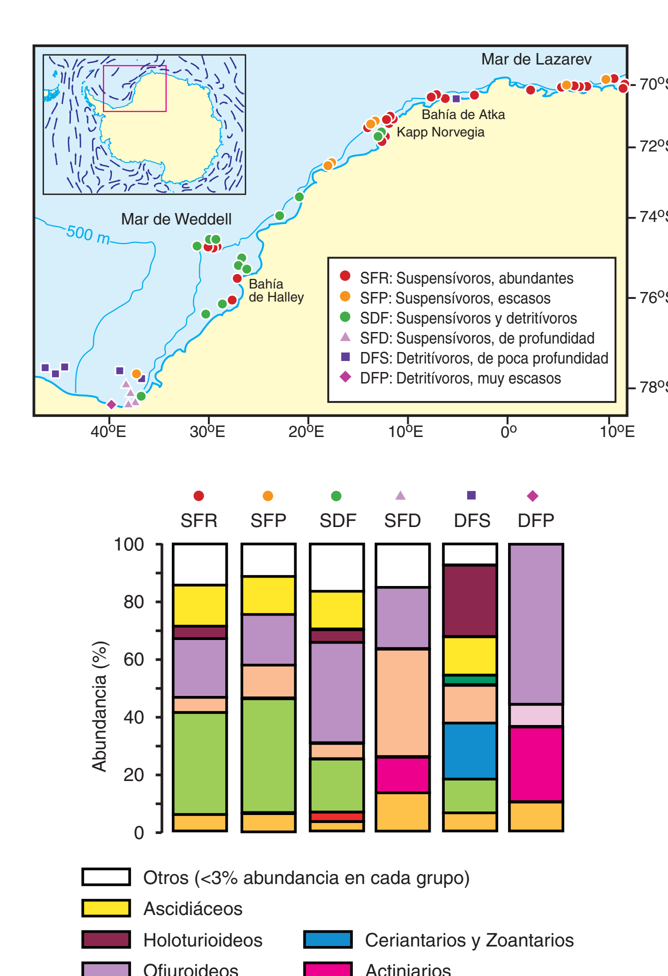
En el fenómeno de la resuspensión se esconde quizá la clave de la estructura y dinámica del bentos antártico. Gran parte de los organismos y materiales depositados en el fondo marino durante el verano antártico han escapado al consumo inmediato y reciclaje consiguiente de los organismos bentónicos.

Por un lado, la sedimentación masiva en determinados lugares crea una capa de restos orgánicos de más de un centímetro de espesor, que se almacenan formando una reserva fresca de alimento para el resto del año. Por otro, la mayor parte de la materia orgánica sedimentada se descompone muy despacio, debido a la baja actividad bacteriana en tales temperaturas, lo que hace que los sedimentos antárticos contengan alimento potencial durante más tiempo. Es como si las comunidades bentónicas de suspensívoros dispusieran de un frigorífico del que, gracias a las corrientes de fondo y a la resuspensión que éstas generan, periódicamente obtuvieran alimento todavía de buena calidad.

Algunos trabajos efectuados a principios de los años ochenta en la bahía de McMurdo por investigadores de la Institución Scripps de Oceanografía, pusieron de manifiesto la intervención del sistema de corrientes en la resuspensión y transporte de partículas orgánicas hacia zonas donde las comunidades de suspensívoros bentónicos adquirían una extraordinaria densidad.



7. DIETA NATURAL de especies de suspensívoros bentónicos. De los estudios efectuados durante los últimos cinco años sobre esos organismos en aguas tropicales, templadas y frías, se desprende que tienen un espectro de presas bastante amplio, mayor del que se creía. La figura, una modificación y actualización de la publicada en 1966 por R. Riedl, de la Universidad de Viena, refleja ese cambio. En color oscuro se indica el espectro conocido hace un tercio de siglo, y el color suave y las cruces manifiestan los cambios producidos, prueba de la suma plasticidad de la estrategia trófica de los suspensívoros bentónicos. Los organismos presa ilustrados son (*arriba*): bacterioplancton, fitoplancton, zooplancton unicelular, meroplancton (larvas) y zooplancton pluricelular. Abajo se ofrece un muestrario de suspensívoros: esponjas, moluscos bivalvos, tunicados, cirrípedos, hidroideos, y antozoos y gorgonarios. La doble escala del cuadro indica rango de tamaño de las presas (*arriba*) y volumen filtrado por m^2 de fondo marino ocupado por los distintos grupos de suspensívoros.



8. LAS COMUNIDADES de suspensívoros bentónicos antárticos están mucho más desarrolladas en las zonas donde las corrientes, por su intensidad y frecuencia, arrastran partículas y las resuspenden. Un buen ejemplo de este acoplamiento entre las condiciones físicas del ambiente y las comunidades biológicas puede verse en la abundancia y composición de las comunidades bentónicas del mar de Weddell, según las investigaciones de J. Gutt, del AWI. En un gradiente norte-sur a lo largo de la plataforma continental del sector oriental del mar de Weddell, se observa una disminución progresiva de los grupos taxonómicos de suspensívoros y un incremento de los grupos constituidos principalmente por sedimentívoros. Los grupos de filtradores activos, como ascidias y briozoos, disminuyen hacia el sur del mar de Weddell.

Recientemente, el equipo de A. Palanques, del Instituto de Ciencias del Mar de Barcelona, ha observado que los procesos de resuspensión en las plataformas continentales del estrecho de Bransfield alcanzan tal magnitud, que las diatomeas y quistes de especies litorales son arrastradas a centenares de metros de distancia, a través de capas nefeloides.

Estos procesos de transporte horizontal revisten un obvio interés para explicar la distribución y abundancia de las comunidades bentónicas. Nos dicen que, si bien la llegada de alimento al fondo marino desde la columna de agua puede estar confinada a los meses de verano, posteriormente aquél se reparte a lo largo de zonas más amplias.

De lo anterior se desprende que hemos de cambiar de raíz el modelo teórico sobre el funcionamiento a gran escala de los ecosistemas antárticos. Téngase presente que, hasta hace poco, la heterogeneidad espacial de las comunidades bentónicas se atribuía en exclusividad al transporte vertical.

A mayor abundamiento, los trabajos recientes del grupo de Thomsen (GEOMAR) y otros sobre la dinámica de las partículas en la capa límite bentónica han demostrado que éstas sufren diversos procesos antes de sedimentar, mecanismos que facilitan su desplazamiento. En efecto, la actividad del flujo horizontal duplica o triplica la del vertical.

T. D. Foster, de la Universidad de California, ha estudiado la dinámica de la circulación cerca del fondo en el mar de Weddell. Debido al choque de las aguas superficiales, más frías, con las profundas, menos frías, se generan diariamente unas ondas internas que, al interaccionar con el talud y la plataforma continentales, generan afloramientos. Sin duda, esos mecanismos hidrodinámicos podrían explicar el papel de las comunidades de suspensívoros antárticos.

La circulación de estas masas de agua por encima de las densas comunidades de suspensívoros bentónicos no sólo generaría resuspensión de material sedimentado, que los suspensívoros podrían aprovechar; también podría aportar a la superficie nutrientes orgánicos originados por la actividad metabólica de los propios suspensívoros.

En el curso de una de las últimas campañas oceanográficas en el mar de Weddell, hemos observado que, en las zonas con densas poblaciones de suspensívoros bentónicos, los sedimentos presentaban una relación de carbono a nitrógeno (C/N) alta, mientras que en fondos sin suspensívoros la relación decrecía, hasta convertirse en una de las más bajas del océano. De lo que se infiere una elevada concentración de nitrógeno en estos sedimentos y, por tanto, que el contenido orgánico de los mismos encierra todavía un sustancial poder nutricio.

En las zonas con suspensívoros y con valores altos del cociente C/N, se observaron valores altos de nitritos, reflejo de intensa actividad descomponedora de la materia orgánica. Con los movimientos generados por las ondas internas, estos nutrientes orgánicos podrían transportarse hacia la superficie y el margen del hielo, siguiendo un modelo propuesto por R. Scharek, del AWI, en 1995, y fertilizar así las aguas superficiales.

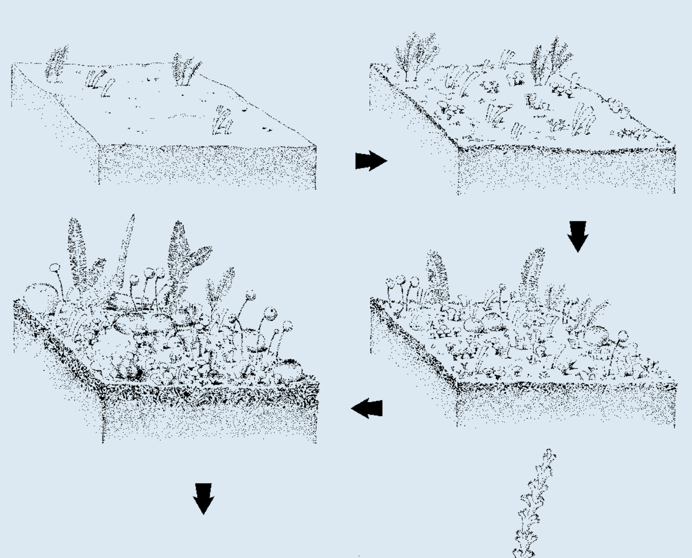
Generalización

Si atendemos a la dieta y la capacidad depredadora, apreciaremos que las comunidades de suspensívoros antárticos no difieren mucho de las que conocemos de otras regiones del globo. Semejanzas entre comunidades que se extienden a otros aspectos, hasta el punto de que la única diferencia reseñable sea un factor de escala. Así, en muchas especies de invertebrados bentónicos antárticos la maduración de las gónadas tarda dos años; pero ello no significa que deban esperar dos años para liberar las larvas. Hemos observado en gorgonias y otras especies que los pólipos presentan al menos dos generaciones o cohortes de gónadas, de suerte que la liberación se produce cada año aunque se inviertan dos en generar las larvas. *Ainigmaptilon*

SUCESION EN EL BENTOS

Las comunidades de suspensívoros antárticos se caracterizan por su diversidad, y acostumbran desarrollar una estructura tridimensional compleja. Fijémonos en la ilustración principal (*abajo*). En primer plano, a la derecha, distinguimos una esponja esférica de la especie *Chinachyra barbata* (hay otras cuatro); a la izquierda, otra cilíndrica con protuberancias (*Rossella racovitzae*). Los "chupa-chups" son esponjas pedunculadas (*Stylocordia borealis*). Los "champiñones" que se aprecian en primer término son sinascidias, tunicados coloniales.

Los cuatro organismos erectos más altos son gorgonias, de tres especies diferentes. Las gorgonias ramificadas de la izquierda y el centro pertenecen a una especie del género *Thouarella*; las flageliformes son *Primnoella antarctica* (*a la izquierda*) y *Ainigmaptilon antarcticus* (*a la derecha*). Sobre *Rossella* hay un crinoideo; sobre la *Thouarella* de la izquierda, un ofiuroideo, y sobre la del centro un holoturioideo, equinodermos filtradores.



Los dos arbolillos de la derecha, en segundo término, son hidroideos de las especies *Schizotricha turqueti* y *Oswaldella antarctica*, como el que se perfila en último término. El resto son briozoos: las cimitarras de la izquierda (*Meliceritta*), los encajes del centro del primer plano (*Reteporella*) y las láminas del centro (*Celarinella* y otras especies laminares).

Estas comunidades representan estadios avanzados de la sucesión ecológica, sucesión que puede verse interrumpida por la destrucción prácticamente total debida al arrastre de los icebergs sobre los fondos someros de la plataforma continental antártica. Todo indica que la recuperación de los fondos denudados por el arrastre de icebergs procede con suma lentitud, de suerte que la sucesión secundaria (*cuatro fases de la cual se indican arriba*) podría prolongarse a lo largo de centenares de años.

Las comunidades bien estructuradas de suspensívoros bentónicos antárticos resaltan, asimismo, por su alto nivel de eficiencia. Las distintas especies se reparten el espectro taxonómico y de tamaños del plancton en función de sus preferencias alimentarias, constituyendo el conjunto una eficacísima máquina de captura, retención y digestión de partículas en suspensión.

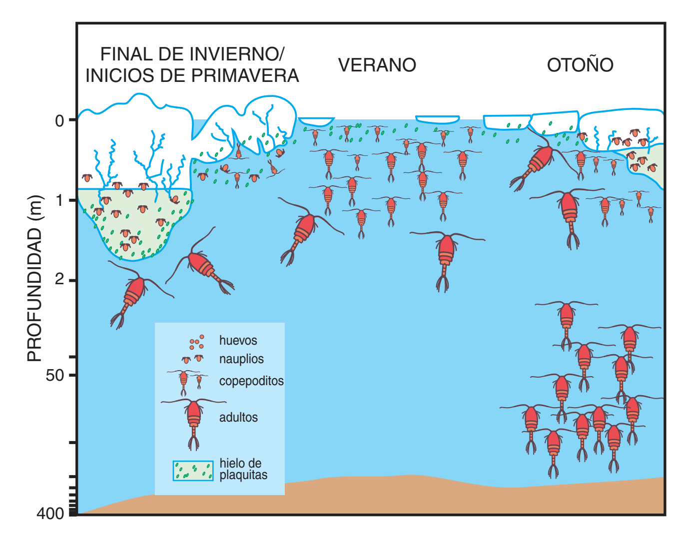
antarcticus tiene el mismo tamaño y el mismo número de gónadas por pólipo que otras especies de gorgonias tropicales o de mares templados. En cambio, *Dasystenella acanthina* presenta sólo un huevo por pólipo, cuyo tamaño dobla el de la especie anterior; en este caso se libera anualmente.

Con la información recabada sobre dietas y tasa de depredación de los organismos bentónicos sésiles antárticos sobre las comunidades planctónicas, queda ahora en entredicho la creencia de que experimentan un desarrollo lento. El crecimiento pausado sería la norma en las grandes esponjas, pero muchos hidrozoos, las gorgonias del género *Primnoisis*, briozoos y otros tienen una tasa de crecimiento elevada. En consecuencia, concurren las dos estrategias de crecimiento (la rápida y la parsimoniosa), igual que se observa en muchos otros ecosistemas.

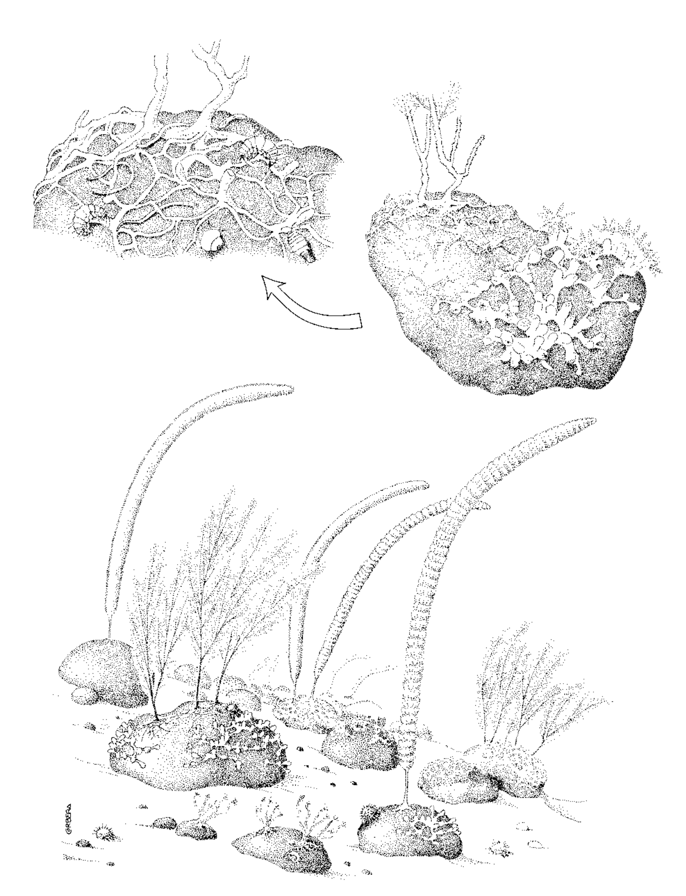
La aproximación de escala se situaría en el marco de los trabajos recientes de investigadores del BAS. Han observado éstos un notabilísimo éxito en el crecimiento y reproducción de varias especies bentónicas polares, pues alcanzan tasas de producción más altas de lo que se venía concediendo, aunque con menos recursos que en otros ecosistemas. El hecho de que necesiten dos años para la madurez gonadal sería uno de los pocos sacrificios que la escasez de recursos les supondría, sin que ello limite su esfuerzo reproductor.

Conclusiones

Vemos, en resumen, que la investigación sobre el papel ecológico de los suspensívoros bentónicos en los mares antárticos en concreto y en los mares de todo el mundo en general han aupado a estos organismos del



9. CICLO BIOLOGICO del copépodo *Stephos longipes*, un buen ejemplo de la pauta de distribución a lo largo de la columna de agua que siguen muchas especies del zooplancton. Lo ha estudiado S. Schiel, del AWI. Llama la atención la presencia durante el verano y el otoño australes de juveniles lejos de la superficie. Algunos adultos sobreviven durante el otoño alimentándose del plancton atrapado en la parte inferior de la banquisa de hielo, pero es un enigma lo que ocurre con los juveniles cerca del fondo: o bien no se alimentan y resisten en un estadio de diapausa, o bien son capaces de cambiar su dieta y alimentarse de nano- y picoplancton heterotrófico, abundante cerca del fondo gracias a procesos de resuspensión. De darse la segunda posibilidad, el zooplancton migratorio explotaría la misma fuente de alimento que los suspensívoros bentónicos; pero ello conllevaría el riesgo de que fuesen capturados por estos últimos, lo que los autores han demostrado.



10. DURANTE LA CAMPAÑA ANT XV/3 1998 del B/O *Polarstern* se descubrió en el mar de Weddell una pequeña montaña submarina que llegaba hasta los 60 m de la superficie. Se observaron allí por primera vez comunidades de fondos duros en el mar de Weddell, ya que la zona litoral se halla cubierta de hielo hasta más de 100 de profundidad; a estas profundidades los fondos son mayoritariamente blandos. Los fondos duros albergaban una comunidad muy peculiar de suspensívoros adheridos sobre pequeños bloques de piedras. El hidrozoo *Oswaldella antarctica*, el estolonífero *Clavularia frankliniana* y la gorgonia *Primnoella gracilis* (*abajo*) forman un entramado de estolones debajo de los cuales habita una rica fauna de nemátodos, anfípodos y moluscos (*arriba*).

escalón de actores secundarios a protagonistas en el drama de la naturaleza marina.

El estudio de esas comunidades en regiones polares y no polares demuestra que, al menos en el litoral y en las zonas de plataforma, los compartimentos pelágico y bentónico de los sistemas marinos guardan una estrecha vinculación (se hallan "acoplados", por decirlo en la jerga ecológica).

Al propio tiempo, otros aspectos relacionados con el marco físico del que depende en buena medida el éxito ecológico de los suspensívoros bentónicos están modificando la teoría vigente sobre el funcionamiento del mar en general y de los mares polares en concreto. Así ha ocurrido a propósito de la importancia otorgada ahora al transporte lateral, lo que obliga a idear nuevos modelos de funcionamiento estacional del Antártico.

El hecho de que una comunidad de organismos situada a 100 o 400 m de profundidad intervenga, en mayor o menor medida y de manera estacional o continua según el área geográfica, en los procesos que ocurren en las capas superficiales de la columna de agua, es un concepto nuevo al que le está dedicando máxima atención el Programa EASIZ.

Quedan muchas preguntas por contestar, naturalmente. No son de segundo orden las relacionadas con el destino de la producción de los mares antárticos, una vez ha sido tan eficientemente aprovechada por los suspensívoros bentónicos. Muchos de ellos se encuentran al abrigo de depredadores, como evidencian las enormes espículas de las esponjas o las sustancias químicas de defensa que empezamos a descubrir en los cnidarios; armamentario éste que dificultaría el consumo por parte de los depredadores bentónicos antárticos.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ANTARCTIC ZOOBENTHOS. W. E. Arntz, T. Brey y V. A. Gallardo, en *Ocean. Mar. Biol. Ann. Rev.*, n.º 32, págs. 241-304; 1994.

BENTHIC SUSPENSION FEEDERS: THEIR PARAMOUNT ROLE IN LITTORAL MARINE FOOD WEBS. J. M. Gili y R. Coma en *Trends in Ecology and Evolution*, n.º 13, págs. 316-321; 1998.

BENTHIC SUSPENSION FEEDERS, KEY PLAYERS IN ANTARCTIC MARINE ECOSYSTEMS? C. Orejas, J. M. Gili, W. E. Arntz, J. D. Ros, P. J. López, N. Teixidó y P. Filipe en *Contributions to Science*, en prensa.

Los primeros



La punta foliácea de piedra que sostengo en mi mano, de delicadeza extrema, no puede corresponder a un arma mortífera. Doy rienda suelta a mi imaginación tratando de reconstruir la vida de hace 14.700 años en las ciénagas del sur de Chile, donde se recuperó esta reliquia. La treintena aproximada de personas que habitaban allí, en el campamento de Monte Verde, fueron algunos de los primeros pobladores de Sudamérica, muy probablemente descendientes del pueblo que alcanzó América del Norte desde Asia atravesando el istmo de Bering, hace al menos 15.000 años. ¿Se percató esta banda errante de su condición de pioneros? ¿O eran ajenos sus miembros a cualquier otra cosa que no fuera satisfacer sus necesidades de subsistencia?

Mis cavilaciones son interrumpidas por Tom Dillehay, profesor de antropología de la Universidad de Kentucky. A él debemos el descubrimiento, en los años setenta, de Monte Verde, el yacimiento de habitación más antiguo de cuantos se conocen en América. En un aula del sótano del recinto universitario, Dillehay ha extendido para mí, sobre una mesa, una amplia colección de artefactos procedentes de Monte Verde. Dirige mi atención a un fragmento de otra punta que, de estar todavía intacta, sería virtualmente idéntica a la que sostengo. "Probablemente talladas por la misma persona", asegura.

Estas vaporosas imágenes de los primitivos exploradores se diluyen y dan paso a otra, la de un artesano invirtiendo horas, quizá días, elaborando tales herramientas de piedra de algo menos de unos 10 centímetros de largo por uno de ancho. El trabajo del artífice es exquisito: las series de pequeños dientes que festonean sus filos son impecablemente simétricas. Quienquiera que fuese el autor de los útiles era un perfeccionista.

La cuestión de cuándo el hombre alcanzó América ha sido tema de discusión recurrente de antropólogos y arqueólogos durante años. Pero cómo vivieron los primeros americanos es asunto que sólo ahora recibe la atención merecida. Los hallazgos de Monte Verde destrozaban la fecha aceptada que situaba la arribada de los pioneros a las Américas hace aproximadamente 14.000 años. El cambio que comportaba el análisis de Dillehay explica su lenta admisión por parte de la comunidad científica, reticencia desvanecida en 1997 tras la publicación de un artículo de aquél sobre el yacimiento en la revista *Science*. (No obstante, todavía quedan escépticos sobre la antigüedad atribuida a Monte Verde.)

Excavaciones en curso en las tierras del este de los Estados Unidos y en distintos puntos de Sudamérica permiten insinuar que la fecha de llegada de los primeros humanos al continente podría remontarse a hace 20.000 o incluso 40.000 años. Tales

americanos

De los recientes hallazgos arqueológicos se desprende que eran pescadores que avanzaron costeando el Pacífico con humildes embarcaciones de piel y madera. Vivían también de la recolección de plantas.

Sasha Nemecek

descubrimientos nos informan, además, de otros aspectos que van más allá del momento en que los humanos se asentaron en América. Con el reconocimiento de nuevos artefactos, Dillehay y otros van recomponiendo poco a poco el día a día de aquellos pioneros, informándonos de sus hábitos de caza, plantas que comían, medios de transporte a través de largas distancias o de la forma de vida de aquellos hombres, mujeres y niños que alcanzaron el Nuevo Mundo.

La opinión más extendida sobre el modo de arribada puede rastrearse desde 1589, cuando José de Acosta, jesuita misionero en Perú, sugirió que los más primitivos americanos habían sido emigrantes llegados desde Siberia hacía miles de años. Una teoría llena de lógica, plenamente aceptada por los arqueólogos a comienzos del siglo XX. Las pruebas parecían irrefutables. Los yacimientos arqueológicos bien datados en torno a los 13.000 años proliferaban por doquier, no se conocía nada más viejo y, además, las herramientas de la mayoría de dichos lugares mostraban llamativas similitudes entre sí, como si las gentes que las crearon compartieran un mismo trasfondo cultural implantado al mismo tiempo en buena parte del continente. La ciencia denominó a este pueblo y a su cultura "clovis" (del yacimiento de Clovis, en Nuevo México, donde se encontraron los primeros útiles de piedra). Las puntas o cabezas de proyectil de tipo clovis menudean en Canadá, en todo el territorio de los Estados Unidos y en América Central.

En algunas partes de los Estados Unidos, particularmente el desierto del suroeste, estas puntas clovis resultaban casi tan comunes como los cactus. ¿Para qué podrían ha-

1. ¿CAZADOR DE MAMUTS O PESCADOR? Durante decenios los arqueólogos han mantenido que los primeros habitantes del Nuevo Mundo fueron cazadores de grandes mamíferos gregarios que transitaron por el puente terrestre de Bering en persecución de sus presas. Pero indicios recientes sugieren que los primeros colonos, durante sus desplazamientos por las tierras templadas, pusieron mayor empeño en la caza menor, en la pesca y en la recolección de plantas. La fotografía de la parte superior corresponde a uno de los artefactos más antiguos hallados en América, una punta o cabeza de proyectil tallada en piedra, procedente de un asentamiento chileno de hace 14.700 años.

ber necesitado las gentes clovis tal cantidad de armas? De nuevo la respuesta parecía clara. Debió de tratarse de voraces cazadores que persiguieron a sus presas —grandes mamíferos salvajes, como el bisonte lanudo— a través del puente terrestre de Bering hace aproximadamente 14.000 o 15.000 años, cuando la capa de hielo que se extendía desde el Polo Norte se había fundido lo justo para despejar un pasillo continental que de norte a sur atravesaba Canadá. Los cazadores, en persecución implacable de los animales, debieron de tardar unos 1000 años en extenderse por América del Norte y del Sur. Por otra parte, el énfasis en unos móviles cinegéticos estaba lleno de sentido —hemos de situarnos, al fin y al cabo, en la Edad del Hielo, en época glacial— en una etapa en la que la carne de mamut o de bisonte hubo de ser un aporte de grasa y proteínas fundamental para la subsistencia de tan primitivas poblaciones. Incluso la piel de aquellas bestias podía convertirse en confortables vestidos.

Thomas Lynch, experto en cultura clovis y director del Museo de Historia Natural de Brazos Valley, en Bryan (Texas), insinuó otra ventaja: “La caza mayor constituye el procedimiento más sencillo para conseguir alimento, máxime si se trata de animales gregarios que, en un principio, no debieron de temer en exceso a los humanos.” El modelo, en este contexto, sería resultado de un vertiginoso *raid* a través del continente que, argüía Lynch, se correspondía bien con la necesidad de los cazadores de desplazarse rápido, “tras unos animales cada vez más recelosos de los humanos”.

La idea de que los primeros americanos fueron cazadores de la Edad del Hielo se aceptó durante decenios, glosada en manuales y revistas científicas. Sin embargo, los investigadores empiezan a percibir puntos de debilidad en la teoría. David Meltzer, profesor de antropología en la Universidad Metodista del Sur, que ha estudiado la cultura clovis en extensión, cree que tal visión de los primeros pobladores, harto simplista, sólo conduce al estereotipo de “una gente que labró un camino a través del continente royendo huesos de mamut”. Algo que el uso objetivo de los datos, dice, no permite sostener.

Meltzer sospecha que las pequeñas bandas de 15 a 30 individuos, típicas de las tribus nómadas de entonces, debieron estar permanentemente

LOS MAS ANTIGUOS YACIMIENTOS DE AMERICA

TEORIA DEL PUENTE TERRESTRE DE BERING

Ciertos emigrantes del noreste de Asia cruzaron el istmo que, entre Siberia y Norteamérica, existía durante la baja Edad del Hielo, cuando los niveles marinos eran inferiores a los actuales. Desde allí, los colonos se desplazaron hacia Canadá a través de un corredor abierto entre los dos glaciares que, por entonces, cubrían la mitad septentrional del continente. Esta ruta les catapultó a los Estados Unidos, desde donde avanzaron por las Américas Central y del Sur. Durante decenios, tal ha sido la tesis aceptada para explicar el paso del hombre al Nuevo Mundo.

TEORIA DE LA RUTA DE LA COSTA DEL PACIFICO

En hipótesis alternativa a la llegada por Bering, se defiende que ciertos exploradores del este de Asia pudieran haber costeado en pequeños botes hasta arribar a América por una vía también septentrional. Este tipo de viaje habría posibilitado que los colonos alcanzaran el extremo sur de América en sólo un centenar de años.

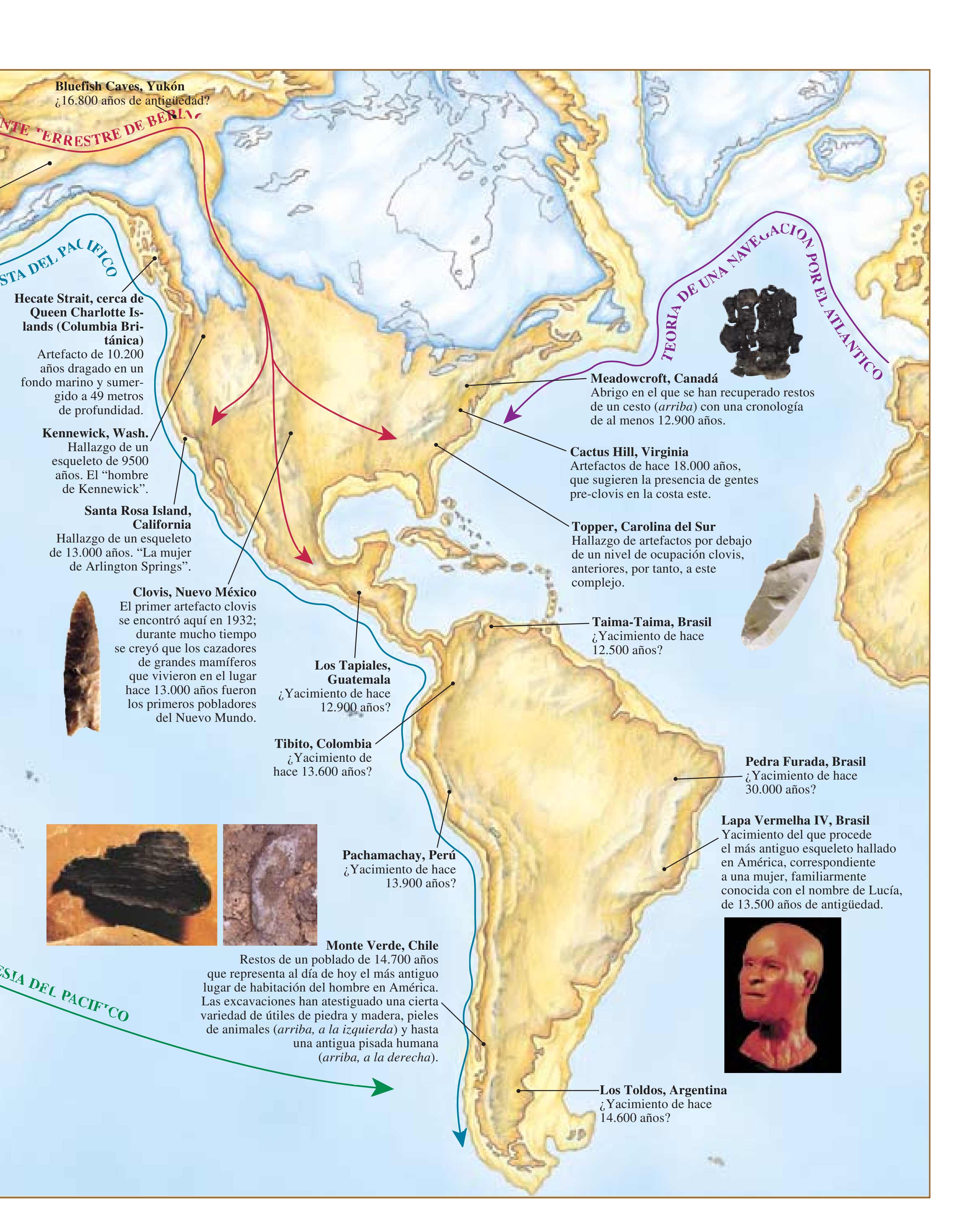
TEORIA DE LA TRAVESIA DEL PACIFICO

Algunos habitantes de Australia y de las islas del Pacífico Sur, navegando cada vez más al este, arribaron, por fin, a Sudamérica. Apenas si hay rastro que apoye esta posibilidad.

TEORIA DE UNA NAVEGACION POR EL ATLANTICO

Gentes de la península Ibérica podrían haberse aventurado en el Atlántico en pequeñas embarcaciones bordeando el límite de los glaciares que entonces cubrían el mar del Norte. Se trata de una hipótesis sin más respaldo que la similitud existente entre las puntas de tipo clovis y las del Solutrense, complejo este último del Paleolítico europeo que se desenvolvió hace entre 24.000 y 16.000 años.





Bluefish Caves, Yukón
¿16.800 años de antigüedad?
NTE TERRESTRE DE BERING
STA DEL PACIFICO
Hecate Strait, cerca de Queen Charlotte Islands (Columbia Británica)
Artefacto de 10.200 años dragado en un fondo marino y sumergido a 49 metros de profundidad.
Kennewick, Wash.
Hallazgo de un esqueleto de 9500 años. El “hombre de Kennewick”.
Santa Rosa Island, California
Hallazgo de un esqueleto de 13.000 años. “La mujer de Arlington Springs”.
Clovis, Nuevo México
El primer artefacto clovis se encontró aquí en 1932; durante mucho tiempo se creyó que los cazadores de grandes mamíferos que vivieron en el lugar hace 13.000 años fueron los primeros pobladores del Nuevo Mundo.
Los Tapiales, Guatemala
¿Yacimiento de hace 12.900 años?
Tibito, Colombia
¿Yacimiento de hace 13.600 años?
Pachamachay, Perú
¿Yacimiento de hace 13.900 años?
Monte Verde, Chile
Restos de un poblado de 14.700 años que representa al día de hoy el más antiguo lugar de habitación del hombre en América. Las excavaciones han atestiguado una cierta variedad de útiles de piedra y madera, pieles de animales (*arriba, a la izquierda*) y hasta una antigua pisada humana (*arriba, a la derecha*).
SIA DEL PACIFICO
TEORIA DE UNA NAVEGACION POR EL ATLANTICO
Meadowcroft, Canadá
Abrigo en el que se han recuperado restos de un cesto (*arriba*) con una cronología de al menos 12.900 años.
Cactus Hill, Virginia
Artefactos de hace 18.000 años, que sugieren la presencia de gentes pre-clovis en la costa este.
Topper, Carolina del Sur
Hallazgo de artefactos por debajo de un nivel de ocupación clovis, anteriores, por tanto, a este complejo.
Taima-Taima, Brasil
¿Yacimiento de hace 12.500 años?
Pedra Furada, Brasil
¿Yacimiento de hace 30.000 años?
Lapa Vermelha IV, Brasil
Yacimiento del que procede el más antiguo esqueleto hallado en América, correspondiente a una mujer, familiarmente conocida con el nombre de Lucía, de 13.500 años de antigüedad.
Los Toldos, Argentina
¿Yacimiento de hace 14.600 años?

amenazadas de desaparición, bien por endogamia bien por cualquier clase de catástrofe natural. Cazar un mamut era, sin duda, tarea muy peligrosa, demasiado incluso para unas gentes que habían hecho de ello su fuente de alimento, casi en exclusiva. Por esa razón debieron volver los ojos a otros recursos, como caza menor, bayas, nueces y probablemente pescado y tortugas, hipótesis que ratifican los descubrimientos de restos de animales pequeños —ciervos, conejos o serpientes— en toda clase de establecimientos de tipo clovis. Desgraciadamente, sin embargo, la técnica asociada a la caza menor, a la pesca y a la recolección —artefactos de madera y cestos— no sobrevive por lo general al paso del tiempo como sí lo hacen las herramientas de piedra.

Existe un yacimiento en Pennsylvania, empero, que ha proporcionado semejante clase de restos. James Adovasio, arqueólogo del Colegio universitario Mercyhurst, ha dedicado cerca de 30 años a la excavación de los abrigos de Meadowcroft, al suroeste de Pittsburgh, donde los primeros pobladores acamparon al menos hace 12.900 años. Entre sus logros sobresalientes destaca el hallazgo de cestos que cree utilizados para transportar plantas e incluso moluscos del inmediato río Ohio. Adovasio ha exhumado también lo que supone son lazos para la práctica de la caza menor y punzones de hueso para el tejido y el curtido de pieles.

Durante gran parte de los últimos 30 años, los arqueólogos han estudiado y debatido la interpretación de estos hallazgos de Adovasio, sin excluir la antigüedad del sitio, aunque el reciente juicio de un científico neutral ha venido a resolver en buena medida la cuestión postrera. “Se han hallado agujas de hueso y la gente diría ‘seguramente las utilizaron para coser pieles’, pero todos sabemos que también podría no haber sido así”, insiste Adovasio. Alega que tales agujas sirvieron para confeccionar tejidos ligeros y frescos de fibras vegetales. “La gente comete el error de pensar que la Edad del Hielo fue una etapa de clima frío continuo. Recuerdan 40.000 eneros, pero olvidan 40.000 julios”, ironiza.

¿Y quién cosía las ropas durante las fases de clima templado? Adovasio lamenta que la imagen oficial de los tempranos cazadores americanos de mamuts silencie el papel de mujeres, niños y abuelos. Se identifica la Edad del Hielo con el cazador y sus proyectiles líticos, pero es obvio que “concentrándonos sólo en las piedras, estamos ignorando el 95 % de lo que estos pueblos hicieron”. Prestemos mayor atención al comportamiento de las sociedades de cazadores-recolectores relictas, recomienda. Las mujeres, los niños y los mayores de ambos sexos aportan la mayor parte del alimento y sostienen sobre sus hombros tareas tan vitales como la confección de ropas, de redes o de cestos. ¿Por qué los más primitivos americanos tuvieron que ser diferentes?

Margaret Jodry, arqueóloga de la Institución Smithsoniana, también advierte sobre el peligro de pasar por alto la cuestión de cómo las familias viajaron a través del Nuevo Mundo. La imagen al uso contempla al pueblo clovis recorriendo a pie la ruta entera. Pero Jodry se pregunta qué hay de los yacimientos clovis hallados a ambos lados de un río. “A menos que estemos sugiriendo que lo cruzaron a nado diariamente para ir a casa, dice incrédulo, debieron contar con barcas para el transporte ¿Cómo ibas a cruzar el Missouri a nado con la abuela, con tu esposa encinta de ocho meses, con tus chicos y tus perros?” Además, apunta, los humanos disponían de me-

LA DATACION ARQUEOLOGICA

CONVERSION DE DATACIONES DE RADIOCARBONO EN FECHAS DE CALENDARIO

La cuestión de cuándo se puso pie en América es algo más que un simple problema de fechas. Se recurre a la datación radiocarbónica para determinar la edad de artefactos de huesos, maderas o carbones. Pero un año de radiocarbono no siempre es un año de calendario.

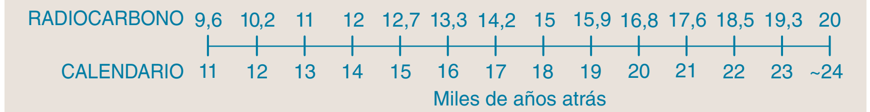
La datación radiocarbónica parte del fenómeno de la absorción de carbono por los organismos. Lo incorporan en su doble forma isotópica de carbono 14 y carbono 12. Mientras un organismo está vivo, la proporción de ambos en sus tejidos es la misma que existe en la atmósfera; cuando ese ser muere, en cambio, la relación C14/C12 varía.

El carbono 14 es un isótopo inocuo que experimenta un proceso de desintegración radiactiva, en tanto que el carbono 12 es estable. Durante la vida de plantas y animales, la respiración les abastece de C14. Tras su muerte, sin embargo, se inicia una pérdida imparable y el equilibrio entre carbono 14 y carbono 12 se altera. Puesto que se conoce la tasa de desintegración del radiocarbono, podemos determinar la edad de un objeto a partir de la cantidad perdida con respecto al C12.

Adviértase que el equilibrio entre el carbono 14 y el carbono 12 no es constante en la atmósfera, lo que supone una alteración del principio básico para la calibración de fechas. Por ello, para convertir años de radiocarbono en años de calendario, se debe acudir a otras escalas de tiempo independientes, basadas en la dendrocronología, núcleos de hielo y en las dataciones uranio-torio.

Para los estudiosos del poblamiento de América, no ha sido fácil calibrar el período entre hace 10.000 y 20.000 años. Durante decenios los arqueólogos se limitaban a presentar sus resultados en años de radiocarbono, sin calibrar. Recientes aportaciones, sin embargo, facilitan la conversión, al margen de subrayar su importancia. Todas las fechas utilizadas en este artículo han sido transformadas en años de calendario.

La distinción entre años de radiocarbono y años de calendario no es algo banal. Un trabajo reciente compara los 13.000 años del esqueleto de Santa Rosa Island, en California, con los 12.500 del yacimiento chileno de Monte Verde sin especificar que la primera es una fecha calibrada y la segunda no. Habrá lectores que comprensiblemente crean, siendo un error, que el esqueleto californiano es más antiguo que el campamento de Chile. Y es que la verdadera antigüedad de Monte Verde —años de calendario o de radiocarbono calibrado— se remonta a los 14.700 años.



LOS AÑOS DE RADIOCARBONO antes del presente (*arriba*) deben ser traducidos a años de calendario (*abajo*), de tal manera que, por ejemplo, un artefacto con una antigüedad radiocarbónica de 11.000 años tiene, en realidad, 13.000 años solares.

dios de navegación al menos desde hace 40.000 años, puesto que, por entonces, habían puesto pie en la isla de Australia.

Las primeras embarcaciones americanas se habrían construido con pieles de animales o con madera, otra vez, por lo tanto, materiales perecederos. Pero Jodry piensa que los arqueólogos no están por ello incapacitados para encontrar huellas del proceso de construcción de aquellos primitivos botes y, utilizando la referencia de determinados grupos indígenas de Norteamérica, ya de época histórica, no ha vacilado en considerar cierta estructura de postes rodeados de piedras los restos de un primitivo "astillero" de época glaciar.

En respuesta a estas innovadoras líneas de investigación, los arqueólogos están empezando a replantearse cómo y dónde excavar. Jodry confiesa que algunos colegas le han comunicado su decisión de revisitar yacimientos ya excavados, a la búsqueda de indicios de embarcaciones. Y ciertos hallazgos de Meadowcroft y otras estaciones arqueológicas han convencido a los estudiosos de la necesidad de buscar algo más que piedras y huesos. (En Monte Verde, Dillehay halló cuerdas anudadas que, en su opinión, sirvieron para amarrar tiendas de piel; los restos de tiendas, pese a su carácter efímero, sí son, por tanto, detectables arqueológicamente.)

Pero también habrá que dirigir las pesquisas, de acuerdo con Dillehay, hacia yacimientos menos habituales. "Puesto que la gente prehistórica suele concentrarse en cuevas y en sitios al aire libre —explica— en los que la conservación de artefactos delicados o de materiales más fácilmente perecederos es improbable, si se quiere encontrar otro Monte Verde —donde un nivel de turba procedente de una ciénaga próxima cubrió el antiguo campamento impidiendo que el oxígeno alcanzara y destruyera los restos— habrá que orientar la búsqueda a lugares húmedos."



2. MONTE VERDE en Chile —hogar de aproximadamente treinta personas hace unos 14.700 años— es el poblado más antiguo que se conoce de América. Tom Dillehay (*arriba, en pie*) y sus colegas han descubierto una rica variedad de artefactos en este yacimiento que equidista de los Andes y del Pacífico.

Esta novísima atención a los artefactos blandos debería contribuir a sustanciar la imagen emergente de los primeros americanos como un pueblo con un avanzado conocimiento de su entorno, que era capaz de abatir un mamut pero que también sabía pescar, recolectar los frutos idóneos, tejer fibras vegetales para la confección de ropas y cestos y construir barcas para pequeños desplazamientos.

Los investigadores, entregados durante décadas al estudio de los artefactos, tendrían también que esforzarse en formular un abanico de posibles explicaciones más amplio para las restantes pruebas que descubren. El especialista en clovis Mike Waters, arqueólogo de la Universidad A&M de Texas, observa que, cuando la comunidad científica aceptó, en 1997, la fecha de 14.700 años de Monte Verde, el reconocimiento tuvo la virtud añadida de relanzar por completo el debate en torno a clovis. Y, en efecto, al tiempo que asimilaban las pruebas del yacimiento chileno, los arqueólogos han ido reprocesando muchas de las viejas ideas sobre los primeros pobladores de América y sobre cómo y cuándo lo consiguieron. Tres son las hipótesis que Waters contempla sobre este último particular: que las gentes clovis fueran las primeras en hollar el nuevo continente, que pudiera haber existido un débil sustrato pre-clovis poco conocido arqueológicamente o, finalmente, que éste hubiera sido de mayor entidad, en cuyo caso cabría esperar descubrir su identidad en ulteriores investigaciones.

La manera en que se produjo el traslado al Nuevo Mundo, el modo de transporte, forma parte de un largo debate. Si sabemos que los indios americanos se desplazaban por la periferia del continente en canoas y kayacs, ¿podrían los primeros colonos haber arribado haciendo uso de botes parecidos? Durante lustros, la comunidad arqueológica rechazó esta posibilidad (¡los cazadores de la Edad del Hielo nunca pudieron haber cargado todas sus armas y provisiones de carne de mamut en unas embarcaciones tan ligeras!), pero a lo largo de los últimos años la idea ha ido sumando adeptos sobre la base de un argumento nada baladí: de no haber ocurrido así, ¿cómo explicar la rapidez con que se produjo el viaje desde Alaska hasta Tierra del Fuego?

La datación obtenida por Dillehay para Monte Verde (14.700 años de antigüedad) es, en este sentido, altamente reveladora. En el caso de un desplazamiento a pie, la gente tendría que haber emprendido el viaje desde Asia hace como máximo 15.700 años, pues antes los hielos polares se extendían por toda Alaska y Canadá, imposibilitando el paso terrestre; y, si tal fecha de entrada es correcta, la antigüedad de Monte Verde indicaría que los primeros colonos tuvieron que recorrer 19.000 kilómetros a través de dos continentes en sólo 1000 años, algo que en tiempos arqueológicos supone correr todavía más rápido que un plusmarquista olímpico.

Una forma para lograr este récord podría ser, sin embargo, costeando en modestos botes el Pacífico de América del Norte y del Sur. Knut Fladmark, profesor de arqueología en la Universidad Simon Fraser de Burnaby, habló de esa posibilidad en los años setenta y continúa siendo uno de los mejores abogados de la entrada de los humanos en América siguiendo una vía costera. Fladmark estima que, viajando a una media de 200 millas al mes, el gran viaje sería una empresa razonable, para nada reñido con la posibilidad de que los colonos se detuvieran durante los me-

ses de invierno o permanecieran en algunos puntos durante una generación o más si los recursos locales resultaban tentadores.

La teoría de Fladmark, aunque atractiva, no será fácil de demostrar. Los niveles marinos, en alza como resultado de la fusión de los hielos glaciares, inundaron millares de kilómetros cuadrados a lo largo de las costas del Pacífico de ambos continentes. La mayoría de los yacimientos próximos al océano que estuvieron habitados hace 13.000 años yacen, a buen seguro, sumergidos.

Un grupo de investigadores se planteó recuperar, sirviéndose de una draga, artefactos del fondo del Pacífico. En 1997, un equipo liderado por Daryl Fedje, arqueólogo de Parks Canada, consiguió extraer un útil de piedra a 49 metros de profundidad en la costa de Columbia Británica. Aunque se trata de una pieza aislada, cuya antigüedad sitúa Fedje en torno a 10.200 años, el hallazgo demuestra que la gente vivió allí, en un punto de la vieja costa hoy cubierta por las aguas, pero revela muy poco sobre la cultura desarrollada.

Las excavaciones submarinas podrían ser el único medio para conocer con exactitud cuándo arribaron los humanos. Y para muchos se trata todavía de una cuestión abierta, con respuestas que van de los 15.000 años a los 50.000. Cuando Fladmark expuso la audaz hipótesis de una migración costera, la fecha de entrada ortodoxa se situaba entre 14.000 y 15.000 años, pero desde entonces son numerosos los que han especulado con una presencia humana mucho más profunda.

Ello me devuelve el recuerdo del habilidoso diseñador de puntas de piedra de Monte Verde. Sus antepasados, si viajaron en bote, teóricamente pudieron haberlas fabricado en el extremo sur de Chile no más de 100 años después de la gran entrada, pero el grupo, entonces, no habría dispuesto de mucho tiempo para adaptarse a los nuevos entornos.

Y para Dillehay esta distinción entre teoría y realidad resulta crucial: el pueblo que vivió en Monte Verde hace casi quince mil años, dice, "sabía perfectamente dónde se ubicaba". Y la mejor prueba de que llevaba cierto tiempo viviendo en la región es que instaló nada aleatoriamente su campamento junto a las fuentes de recursos de primera necesidad y a menos de una hora de camino de los humedales en los que abundaban exuberantes plantas comestibles. Además, como el océano y el piedemonte de los Andes no estaban a más de un día de marcha, puede decirse que el grupo había elegido cuidadosamente su asentamiento entre tres diferentes ecosistemas en los que podía abastecerse de alimento y materias primas.

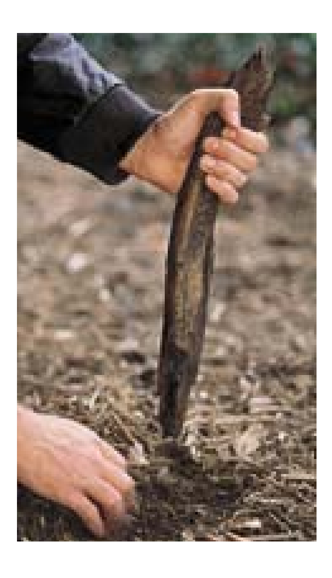
Dillehay ha hallado pellas secas de algas marinas que aquel pueblo chupaba, probablemente por su alto contenido de yodo, y también huesos de mastodontes, que se duda si fueron cazados por los monteverdeanos o eran restos de carroña de animales atrapados en el lodo de las ciénagas vecinas. Parece verosímil, sospecha, que aquellas gentes utilizaron costillas de grandes mamíferos como palos cavadores para desenterrar tubérculos y rizomas.

Un conocimiento tan elaborado del medio no se improvisa; requiere de la observación continuada a lo largo de varias generaciones, aunque sea imposible determinar con exactitud el tiempo que se precisó para ello en Monte Verde. La llegada de humanos modernos a nuevos continentes sólo ha tenido lugar dos veces en el transcurso de la historia —en Australia y en América—, por lo que no abundan las referencias. Se impone recabar información en contextos más amplios. Si en el valle del Indo o China se necesitaron decenas de miles de años para que emergieran complejas civilizaciones, razona Dillehay, los americanos —a menos que fueran las gentes más extraordinarias del mundo y accedieran a la civilización en sólo un par de miles de años— debieron de haber llegado al continente bastante tiempo atrás de las fechas normalmente manejadas, tal vez hace 20.000 años.

Una datación tan temprana podría verse reforzada por otras dos clases de argumentos. La lingüista Johanna Nichols, de la Universidad de California en Berkeley, sostiene que la asombrosa diversidad de lenguas atestiguada entre los nativos americanos no es posible sin una presencia humana en el continente de al menos 20.000 años, si es que no de 30.000. Y también los genetistas, entre los que se encuentran Theodore Schurr, de la Fundación Southwest de Investigación Biomédica de San Antonio en Texas, y Douglas Wallace, de la Universidad de Emory, presentan argumentos similares sobre la base de la diversidad genética de las poblaciones actuales. La comparación de determinados marcadores de ADN presentes en modernos nativos americanos y siberianos inducen a atribuir una antigüedad a la llegada de estos últimos al Nuevo Mundo de al menos 30.000 años.

Estas cronologías antiguas, si son correctas, tendrían implicaciones muy importantes. De acuerdo con la tesis aceptada, el hombre moderno llegó a Europa y Asia desde Africa hace 50.000 o 60.000 años. Pero si se adelanta la fecha de arribada a América, habrá que introducir el poblamiento del Nuevo Mundo en el horizonte de la historia de la evolución. Para Robson Bonnichsen, del Centro para el Estudio de los Primeros Americanos de la Universidad estatal de Oregón, "la ocupación de las Américas debería entenderse en el marco del proceso que conduce a la expansión global de los humanos modernos (*Homo sapiens sapiens*)".

Algunos indicios relacionan la colonización de América con la emigración de los modernos humanos fuera de Africa. A través, quizá, de





3. ENTRE LOS UTENSILIOS hallados en Monte Verde, se documentan palos cavadores de madera (*izquierda*) y los anclajes, de este mismo material, correspondientes a las chozas o tiendas construidas por la treintena de habitantes del poblado.

uno de los más sorprendentes descubrimientos de los últimos años, Walter Neves, de la Universidad de São Paulo, ha determinado que el más viejo esqueleto humano conocido en América —una mujer adulta del sureste de Brasil, que vivió hace 13.500 años— recuerda, en sus rasgos, a los aborígenes africanos y australianos más que a los asiáticos o a los nativos americanos modernos. Neves deduce de ello (y del estudio de otro medio centenar de cráneos de entre 8900 y 11.600 años de antigüedad) que los primeros inmigrantes americanos carecían de rasgos mongoloides.

Neves se apresura a apuntar, sin embargo, que él no piensa que tales gentes llegaran directamente de Africa o Australia, sino que se trataba de grupos desgajados de la banda que se desplazaba lentamente a través de Asia y que terminó por recalar en el sur de Australia. De acuerdo con el registro fósil, los grupos mongoloides pisaron Sudamérica hace unos 9000 años, teniendo lugar entonces la suplantación del sustrato poblacional previo. "Carezco de respuesta para saber qué ocurrió exactamente", reconoce Neves. "Tal vez una guerra o una matanza; acaso un simple fenómeno de absorción, iniciando la mezcla de pueblos que iba a continuar en el futuro", dice.



4. LOS PRIMEROS EMIGRANTES llegados al Nuevo Mundo pudieron haber viajado en pequeñas embarcaciones, hechas probablemente con pieles de animal o madera. La llegada del hombre en época glacial a Australia, un espacio acusadamente insular, es un buen punto de referencia para preguntarse por los medios de navegación de aquellos tiempos pretéritos.

Parece, así, que el Nuevo Mundo ha actuado como un crisol durante milenios. Aquellos famosos cazadores de la Edad del Hielo sin duda cruzaron el entonces istmo de Bering y establecieron una cabeza de puente en el continente. Pero ellos probablemente no fueron los primeros en hacerlo ni los únicos, a buen seguro. Gracias a los más recientes hallazgos arqueológicos, empiezan a vislumbrarse formas de vida que recuerdan a las de otros pueblos indígenas americanos, como los pescadores que costeaban el Pacífico con sus humildes embarcaciones o los cazadores-recolectores que vivían en los bosques templados de ambas Américas.

Al mismo tiempo, la arqueología apenas si consigue aportar datos con la suficiente rapidez para satisfacer los nuevos planteamientos. Se investiga en Alaska en busca de algún resto de los pioneros; los geólogos están intentando determinar con exactitud cuándo se fundieron los glaciares lo suficiente para dejar expedito el paso hacia Canadá y los Estados Unidos. Otros estudiosos continúan a la caza de indicios todavía más antiguos de la cultura clovis. El este de los Estados Unidos es el escenario de importantes excavaciones en marcha: Cactus Hill, en Virginia, y Topper Site, en Carolina del Sur. Los primeros hallazgos de Cactus Hill sugieren ya que un grupo humano afín al horizonte clovis podría haber vivido en la zona hace alrededor de 18.000 años.

Y Topper fue el escenario elegido por Al Goodyear, arqueólogo de la Universidad de Carolina del Sur, para regresar a un emplazamiento clovis ya conocido, cerca del río Savannah, con la intención de comprobar si por debajo, en niveles más profundos y por tanto más viejos, se registraba la presencia de artefactos de técnica distinta de la clovis. La había. Ha encontrado puntas de piedra diferentes de las clovis, láminas líticas de reducida talla y raederas asociadas al trabajo de madera, hueso y asta.

¿Quiénes eran los autores de tales herramientas? Goodyear se hizo luego acompañar de dos expertos en datación por radiocarbono, Mike Waters y Tom Stafford, de Texas A&M y laboratorios Stafford de Investigación, respectivamente. No han llegado todavía a ninguna conclusión sobre la antigüedad de los restos y, como dice Stafford, cabría que éstos no fueran más de 100 años anteriores a clovis. Goodyear, en todo caso, confía en poder excavar en una próxima área pantanosa, donde las condiciones para la conservación de objetos delicados, tales como herramientas de madera o tejidos, sean más favorables.

Se trabaja también en yacimientos de Sudamérica, donde se han descrito campamentos cuya antigüedad podría superar los 30.000 años. Dillehay, sin embargo, se muestra cauto mientras hallazgos más firmes no ratifiquen tan remotas cronologías. En todo caso, abriga pocas dudas de que los individuos que habitaron en Monte Verde o en cualquier otro rincón del Nuevo Mundo —en la medida en que éste fuera realmente nuevo— se sintieron partícipes de "uno de los más intrincados, apasionantes y evocadores episodios de la aventura humana". En *The Settlement of the Americas* describe la expansión de los recién llegados por nuevos escenarios, todavía naturales, como "una gran aventura que hubo de imprimir en los protagonistas un acusado sentido de misión", tal vez no muy distinto del que se percibe hoy con el programa espacial.

¿No es esta autoconciencia un rasgo demasiado moderno? ¿No sería la supervivencia más básica la principal aventura de aquellos pueblos? La gente elige los mismos buenos lugares para acampar una y otra vez, responde Dillehay, así que nada tendría de extraño topar con los restos de ocupaciones humanas previas. En ese contexto —añade— es lógico suponer que a los pioneros no les pasara inadvertido que nunca ser humano alguno les hubiera precedido en la ocupación de sus asentamientos. "Cuando se percataron de ello, en ese preciso momento, supieron que eran los primeros."

TALLER Y LABORATORIO

Shawn Carlson

Cometas que sirven de plataformas experimentales

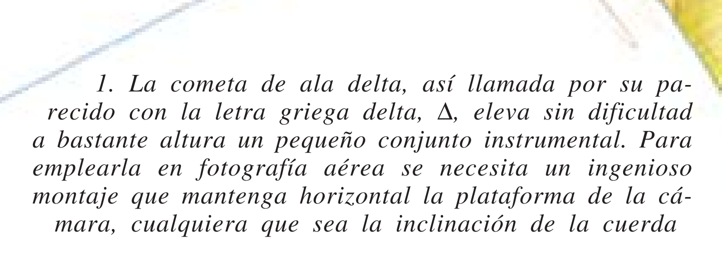
Para mi pasmo, pocas semanas antes de casarnos Michele, mi esposa, me confesó que nunca había volado una cometa. Volar cometas fue una tan maravillosa parcela de mi niñez, que no podía imaginar haber crecido sin ella. Decidí enseñarle.

Escogí uno de mis lugares preferidos para lanzar cometas, frente a los acantilados de la reserva estatal de Torrey Pine, junto a La Jolla (California), donde yo sabía que podría contar con la uniforme brisa procedente del océano para formar una corriente ascendente.

El mes pasado el rito se repitió con nuestra hija de dos años, en la misma playa. Cuando me pidió que elevara por los aires a su osito de peluche, me acordé de que las cometas hace siglos que brindan a los aficionados un acceso barato a las grandes alturas. Recordemos las famosas investigaciones de Benjamin Franklin sobre los rayos, experimentos que se han convertido en un símbolo de la capacidad de las personas comunes para efectuar investigaciones científicas. Durante muchos años el logotipo de esta sección fue la cometa de Franklin; por eso resulta embarazoso admitir lo poco que aquí se ha publicado acerca de las cometas, deficiencia que la oferta de este mes debe contribuir a rectificar.

Las cometas constituyen unas magníficas plataformas para la fotografía aérea, del máximo interés para arqueólogos y geólogos, entre otros. Las vistas que se consiguen desde la altura de una cometa (unos 300 metros) son perfectas para controlar toda clase de cambios ambientales. Pero no acaban ahí sus posibilidades: los últimos modelos de sensores y tabuladores electrónicos ligeros deberían servir de detonantes para investigaciones de otras clases apoyadas en las cometas. Por ejemplo, los meteorólogos en ciernes podrían determinar la temperatura en función de la altitud sirviéndose de un termopar y un sencillo sensor manométrico. Y elevando un anemómetro de hilo caliente podrían averiguar la velocidad del viento en cotas más altas. Aunque este artículo se ocupa sólo de la fotografía aérea desde cometas, FAC como la llaman sus practicantes, estoy desde luego a la busca de iniciativas cometarias de otros tipos.





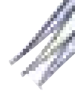


1. La cometa de ala delta, así llamada por su parecido con la letra griega delta, Δ, eleva sin dificultad a bastante altura un pequeño conjunto instrumental. Para emplearla en fotografía aérea se necesita un ingenioso montaje que mantenga horizontal la plataforma de la cámara, cualquiera que sea la inclinación de la cuerda

¿Qué clase de cometa es la mejor para transportar instrumentos científicos? Franklin se limitó a la cometa rómbica clásica, pero las hay de una gran variedad de formas. Para los céfiros suaves de no más de 16 km por hora, las "Rokkaku" dan un buen resultado. Las grandes, de una superficie algo menor que 100 centímetros cuadrados, pueden comprarse en el comercio o contáctese con Into the Wind (800-541.03.14). Para brisas de moderadas a fuertes (de 16 a 32 km por hora) los practicantes FAC se decantan por los diseños de "perfil aerodinámico" o "parafoil". Estos captavientos ligeros carecen de armazones rígidas, son plegables para facilitar el transporte y se asemejan a paracaídas inflados. Tales cometas vuelan bien con las leves brisas otoñales y tiran como tractores bajo vientos intensos.

Mis cometas preferidas son las alas delta. Estas también se muestran estables con vientos moderados, y la de 360 cm entre puntas puede desarrollar una tracción de unos 580 newton bajo una ráfaga intensa, lo que basta para elevar una masa de unos 13 o 14 kg. Para conseguir una tracción mayor, los practicantes FAC a veces conectan en serie dos cometas, con unos 30 metros de separación.

Pero, atención, una cometa bajo un viento fuerte ejerce una fuerza suficiente para separarle los pies del suelo a un adulto. Por tanto, no hay que bregar con una cometa de gran tamaño salvo que se disponga del equipo adecuado. Ineludibles son los guantes de piel. Y la resistencia de la cuerda debe ser al menos de dos veces y media la tracción máxima probable de la cometa. Los avezados suelen ceñirse cinturones de piel para herramientas a los que sujetan carabineros y otros útiles de escalada que les permite controlar la cuerda. Otra sugerencia: para debilitar las riostras de mis cometas ala delta hago en ellas una muesca y así me aseguro



de que fallará la cometa antes de que se rompa la cuerda.

Poner en vuelo una cometa no es difícil, pero hacer fotos con ella exige cierta pericia. Por suerte, podemos aprender de los demás: los aficionados llevan elevando cámaras con cometas desde comienzos del siglo XX. Los iniciadores consiguieron unos éxitos limitados al carecer de plataformas que se mantuvieran a nivel y estables en toda circunstancia. Un ingenioso francés, de nombre Pierre Picavet, resolvió el problema en 1912. En la figura 2 se muestra la suspensión que hoy lleva su nombre. El conjunto instrumental cuelga de dos varillas perpendiculares, de unos 30 cm cada una. La cruz está unida a la cuerda de la cometa mediante 15 metros de cuerda enhebrada a través de ocho pequeñas poleas. Estas pueden ser de las que se venden en las tiendas de modelismo naval para maquetas gobernadas por radio (a falta de un suministrador cercano, puede probarse con Proctor Enterprises; 503-678.13.00). El montaje Picavet puede deslizarse libremente de un lado a otro según la altura de la cometa, con lo cual se mantiene nivelada la plataforma instrumental.

Para aislar la suspensión Picavet de las grandes oscilaciones laterales que a veces padecen las cometas bajo vientos intensos, hay que sujetar el montaje a unos 30 metros por debajo de la cometa. Usese un aro metálico, tal como un anillo chavetero grande, y un nudo de cabeza de alondra para unir la suspensión a la cuerda de la cometa en dos puntos separados unos dos metros.

Con el viento empujándola, la cuerda de la cometa desarrolla vibraciones de alta frecuencia, que al propagarse a través de la suspensión pueden hacer que las fotos salgan borrosas. Para obviar este inconveniente podemos valernos de anillos tóricos unidos a la cuerda de la cometa. Los anillos tóricos de caucho que se emplean para sujetar los silenciadores de escape, disponibles en las tiendas de recambios para automóviles, son baratos y muy eficaces para amortiguar las vibraciones.

Aunque sirva cualquier cámara, algunas son favoritas de los practicantes FAC. Una de ellas es la Samsung Maxima Zoom 145, capaz de tomar automáticamente todo un rollo de fotos. Regulándole el cronómetro para un minuto o dos entre disparos, podemos ajustar la altura de la cometa y cambiar de posición entre fotogramas.

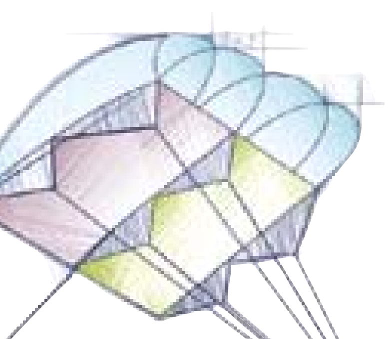
Hay otras cámaras de apuntar-y-disparar que también resultan. Pero los más limitados disparadores automáticos de la mayoría de otros modelos requieren reajuste tras cada foto. Aunque sea tedioso recoger la cometa tantas veces, es la forma en que se han tomado millares de fotografías aéreas asombrosas. Con todas las cámaras, úsese película de sensibilidad ASA 400 y ajústese el obturador a la exposición más corta posible para las condiciones de luz y evitar así las borrosidades por movimiento.

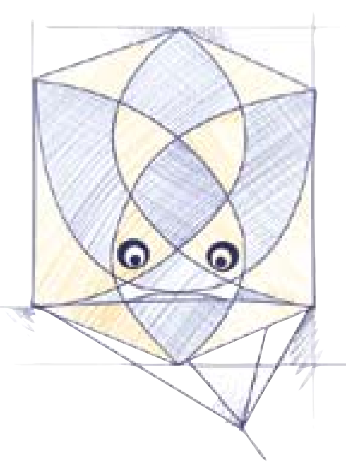
Los practicantes avanzados adaptan accesorios diseñados para maquetas de aviones gobernadas por radio. Esos "servos" pueden girar e inclinar la cámara y, además, disparar el obturador a la orden. Para más información sobre tales opciones, consúltese la página Web de la Society for Amateur Scientists. Sea cual fuere la estrategia adoptada, es buena idea dotar, como se muestra, de un "tren de aterrizaje", hecho de pelotas de entrenamiento de golf, al alojamiento de la cámara. Así se suavizará la toma de tierra si el viento se calmase de repente, devolviendo al suelo la góndola con demasiada rapidez.

Como servicio a la comunidad científica, la Society for Amateur Scientists ha creado una extensa biblioteca de enlaces con páginas Web para entusiastas de las cometas. Visite www.sas.org y pique en el botón "Forum". Se puede escribir a la sociedad 4735 Clairemont Square PMB 179, San Diego, CA 92117, o llamar al 619-239.88.07.

NUDO DE CABEZA DE ALONDRA
ARO METALICO DE CHAVETERO
POLEA DOBLE
ARO TORICO DE CAUCHO
AROS METALICOS DE CHAVETERO
POLEA DOBLE
POLEAS SIMPLES
RIOSTRAS RIGIDAS
SOPORTE DE LA CAMARA IMPROVISADO
PELOTAS DE PLASTICO DE ENTRENAMIENTO DE GOLF

2. La suspensión Picavet nivela el soporte de la cámara mediante 15 metros de cuerda, ocho poleas, dos riostras y tres aros metálicos. Un nudo de cabeza de alondra (recuadro) *une los aros metálicos superiores a la cuerda de la cometa y dos anillos tóricos de caucho de gran tamaño impiden que las vibraciones de la cuerda agiten la cámara y que las fotos salgan borrosas*





3. Otros tipos de cometa que pudieran ser útiles para elevar instrumental científico incluyen las de diseño parafoil (arriba) *y la "Rokkaku", o cometa de combate japonesa* (derecha)

Juegos matemáticos

Ian Stewart

El Hex reclama sus fueros

¿Le aburren los juegos de tablero? De ser así, tal vez le convenga echarle un vistazo al llamado Hex. Es tan adictivo como el mejor de los juegos de ordenador y le resultará, como ejercicio mental, muy superior. Cameron Browne acaba de publicar *Hex Strategy: Making the Right Connections*, el primer libro en explorar exhaustivamente el juego y la forma de ganar en él.

El Hex es un juego bipersonal, cuyo tablero es un panal rómbico de celdillas hexagonales. El tablero estándar es de 11 por 11. Cada jugador "posee" dos lados opuestos del tablero; las cuatro esquinas son de propiedad común. Dispone también de cierto número de fichas; en las ilustraciones, uno de los bandos utiliza fichas rojas, y el otro, azules. Las reglas son de una sencillez aplastante. Para determinar quién sale se lanza una moneda; después, los jugadores van situando por turno sus fichas en las casillas libres del tablero. Gana quien consiga formar una cadena de fichas propias que conecte los dos lados que posee. La cadena puede tener bucles y ramificaciones; sólo importa que las fichas formen un camino conexo de un lado al opuesto. Aunque sencillo en apariencia, tal simplicidad es engañosa. El Hex es juego de profunda sutileza.

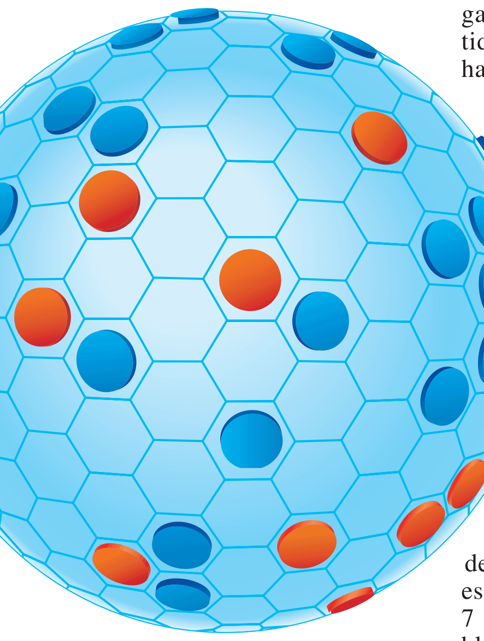
Inventado por Piet Hein, matemático y bardo danés, el juego apareció en el número del 26 de diciembre de 1942 del diario *Polytiken*, con el nombre de "Polígono". Fue inventado de nuevo en 1948 por el matemático John Nash, en sus tiempos de doctorando en Princeton. Más adelante, Nash sería galardonado con el premio Nobel de Economía por sus trabajos en teoría de juegos. Martin Gardner, en 1957, se ocupó del Hex en la edición matriz de esta revista, con el resultado de que el juego se convirtió de la noche a la mañana en una especie de locura de todos los departamentos de matemáticas del mundo.

El número de jugadas es finito (un máximo de 121 en el caso del tablero de 11 por 11); una cadena conexa que vaya de lado a lado para un jugador impide necesariamente al otro jugador formar una cadena conexa propia. Parece obvio que ha de haber un vencedor: a un jugador sólo le será imposible formar una cadena que le dé la victoria si el otro consigue crear antes la suya. También se puede demostrar que, si jugase de forma óptima, el primero en actuar ganaría siempre.

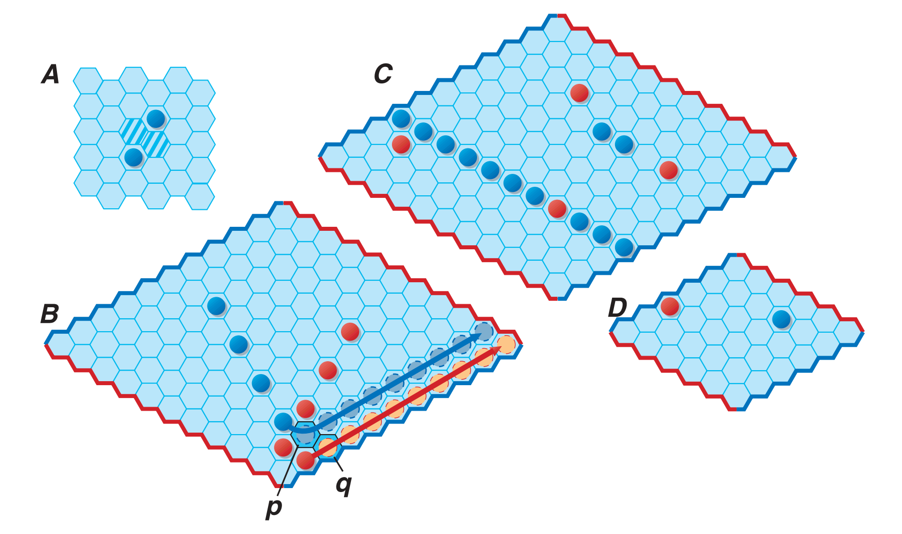
La demostración se vale de una técnica conocida por "robo de estrategia". Supongamos que las rojas salen primero y que existe una estrategia que les garantice la victoria a las azules. Si así fuera, las rojas podrían averiguar en qué consiste tal estrategia y valerse de ella para vencer a las azules. Supongamos que las rojas, después de situar en el tablero su primera ficha, olvidan su jugada de apertura. El bando rojo actúa entonces como si fueran las azules las que abrieran y tuvieran las rojas el segundo turno. Ante cualquier jugada de las azules, las rojas, ateniéndose a la supuesta estrategia, responderían correctamente. Cabría la posibilidad de que tal estrategia exigiera a las rojas colocar una ficha en la casilla de la jugada de apertura "olvidada", pero eso no es problema: dado que una de sus fichas ocupa la celdilla deseada, el jugador se está ateniendo a la estrategia. Lo que ha de hacer, en consecuencia, es una jugada distinta de la prevista (ya realizada) y ocupar una casilla vacía, que pasa a ser ahora la nueva jugada "olvidada."

Procediendo de este modo, las rojas pueden lograr la victoria. Pero ahora nos encontramos en una curiosa situación. Al robar así la estrategia supuestamente vencedora para el segundo jugador, las rojas han jugado las primeras y ganado la partida, independientemente de lo que hagan las azules. La única salida posible de este "impasse" lógico es la conclusión de que no existe estrategia de victoria para el segundo jugador. Y dado que cada partida es finita y uno de los jugadores ha de acabar ganándola, ha de haber una estrategia de victoria para el primero.

A primera vista, se podría pensar que esta demostración desprovee de interés al juego, porque ambos jugadores saben quién tendría que ganar. Pero la demostración no nos dice cuál es la estrategia de victoria del primer jugador. El mayor de los tableros para el que realmente es conocida tal estrategia mide sólo 7 por 7. Así pues, incluso en un tablero de 8 por 8, el primer jugador sabe que, en teoría, debería poder ganar, pero no sabe cómo conseguirlo. Y por si ello no le pareciera justo al segundo jugador, hay quienes admiten una regla opcional: en cuanto el primer jugador efectúa el movimiento de apertura, el segundo puede optar por trocar esa ficha por otra propia, en lugar de ocupar alguna de las casillas vacías.



1. En un juego de balón el campo es una esfera teselada mediante hexágonos y pentágonos. (Los 12 pentágonos de la esfera hállanse sobre el perímetro de la figura; no pueden verse desde este ángulo.) En esta variante del Hex, gana la partida el primer jugador que rodee completamente una casilla (que se halle vacía



2. La estrategia básica del Hex consiste en construir puentes desde un borde del tablero hasta el opuesto. El puente se construye (A) *situando fichas en dos casillas no contiguas y separadas por dos casillas intermedias (rayadas en azul) limítrofes con las dos casillas ocupadas. La construcción de escalas* (B) *constituye otra estrategia más avanzada. En este ejemplo, las rojas ganan la batalla de la escala. Por último, dos problemas para los lectores* (C y D). *En cada una de estas partidas, ¿qué casilla deben tomar las rojas para asegurarse la victoria?*

Una exposición completa del Hex ocuparía esta sección durante no menos de cinco años, por lo que me ceñiré a dos de sus características. La primera es que no es preciso ocupar casillas para que éstas desempeñen un papel estratégico. En la figura 2A, vemos un puente en el que dos casillas no adyacentes ocupadas por las azules están separadas por dos casillas intermedias limítrofes ambas con casillas azules. Mientras las casillas intermedias no se ocupen por las rojas, las dos casillas azules se encuentran unidas, pues en cuanto las rojas jueguen en una de las casillas intermedias, las azules podrán ocupar la otra. Los jugadores de Hex intentan con frecuencia construir puentes a través del tablero. Los puentes no son invencibles, empero. Un puente azul puede ser vencido si las rojas consiguen ocupar una de las casillas intermedias al tiempo que amenazan simultáneamente con una jugada que les daría la victoria en otro lugar. Ahora bien, tal empeño puede resultar delicado de realizar, por lo que es mejor impedir que su oponente construya demasiados puentes.

Un principio general útil de recordar es que una cadena sólo tiene la fuerza de su eslabón más débil. Si nuestro oponente puede atacar algún punto débil de nuestra cadena con esperanzas de éxito, deberíamos reforzarlo o atacar el del adversario. Para ocultar nuestras intenciones suele convenir ir reptando hacia sus puntos débiles desde cierta distancia.

Entre otras estrategias más avanzadas está la construcción de escalas, que surgen cuando un jugador trata de formar una conexión hasta un lado. En la figura 2B se ofrece el comienzo de una escala, siendo el turno de las azules, que no tienen más remedio que jugar en la casilla *p*; de no hacerlo, las rojas pueden imponer su victoria. Pero, por igual razón, las rojas han de ocupar la casilla *q*. Si las azules se empeñan en seguir estableciendo una conexión al mismo lado (y durante varias jugadas habrá de hacerlo obligadamente para no perder), entonces las rojas se ven forzadas a seguir bloqueándola, extendiéndose así a lo largo del lado dos cadenas paralelas de fichas azules y rojas. No obstante, las azules no se han percatado de que, si este proceso continúa, las rojas vencerán. Importa prever la aparición de escalas y bloquear las de nuestro oponente antes de que las inicie. Si en un estadio anterior del juego las azules hubieran situado una de sus fichas junto al borde, serían las vencedoras en el toma y daca de la escala.

Hex Strategy examina, además, una pléyade de variantes del juego Hex básico. Por ejemplo, el juego llamado Y se desarrolla en un tablero triangular, siendo el vencedor quien primero toca los tres bordes. Al igual que en el Hex básico, no se conocen estrategias de victoria para el Y, salvo en tableros muy pequeños. Hex puede ser jugado también sobre un mapa político de la España peninsular (no hay dificultad en incluir las provincias insulares estableciendo los convenios de contigüidad pertinentes): basta tomarlas como casillas y los límites septentrional, meridional, oriental y occidental como lados a conectar. El Hex se puede jugar incluso sobre una esfera teselada con hexágonos y pentágonos (*véase la figura 1*). El primero en rodear una celdilla (ya sea vacía u ocupada por su oponente) gana la partida.

Para terminar, he propuesto un par de problemas de Hex. El primero, presentado en la figura 2C, procede del artículo de Hein sobre el juego; el problema consiste en averiguar la casilla (sólo hay una) que pueden jugar las rojas para asegurarse la victoria. Si les resulta demasiado fácil pueden probar mano en el rompecabezas ideado por Bert Enderton, un programador de Pittsburgh, para un tablero de 6 por 6 (*2D*). Se trata, como antes, de hallar la casilla que, de ser ocupada por las rojas, les asegura la victoria.

Acuse de recibo

En la sección de Acuse de recibo de julio aparecía una elegante superficie que tiene sólo un borde y una cara (*abajo*), enviada por Josiah Manning. Preguntaba allí a los lectores si esta superficie era topológicamente equivalente a una banda de Möbius. André Gramain, de la Universidad de Tours, respondió que el problema está ya estudiado en un libro suyo. Gramain dice que la superficie de Manning es topológicamente equivalente a una botella de Klein con un agujero, mientras que la banda de Möbius es topológicamente equivalente al plano proyectivo con un agujero. Y dado que la botella de Klein y el plano proyectivo no son equivalentes, las dos superficies han de ser topológicamente distintas.

—*I.S.*

Mark Alpert

Una caja negra mejorada

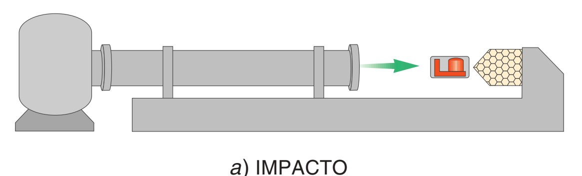
Tras un accidente aéreo, los investigadores se afanan por recuperar las cajas negras. La norteamericana Oficina Federal de Aviación (FAA) exige que todas las aeronaves comerciales de gran tamaño porten dos: la grabadora de voces de cabina, que recoge las voces de la tripulación de vuelo y otros sonidos procedentes de la cabina, y el registrador de datos de vuelo, que anota la altitud del aparato, su velocidad aerodinámica, su rumbo y otras lecturas instrumentales. Dado lo crucial de esa información para averiguar las causas de una catástrofe, los registradores deben diseñarse para que los datos almacenados resistan cualquier impacto.

Los primeros registradores de vuelo se introdujeron a finales de los años cincuenta. Dieron en llamarse cajas negras, denominación que perduró incluso después de que la ley impuso que se pintasen de naranja claro para facilitar su localización tras un accidente. Los registradores modernos emplean microcircuitos de memoria flash, capaces de almacenar datos durante varios años sin alimentación de energía. Los mejores registradores de estado sólido pueden guardar del orden de 80 megabytes, mucho menos que la memoria de la mayoría de los ordenadores personales, pero suficiente para almacenar unas dos horas de grabaciones de voces de cabina o un día completo de lecturas de los instrumentos del avión. Esos registradores contienen también tarjetas de circuito que procesan y comprimen los datos, aunque sólo los microcircuitos de memoria están encerrados en el bloque antichoque de la caja. Ese bloque se cubre con un blindaje grueso de acero para que resista los aplastamientos por impacto. Bajo el acero hay una capa de aislante térmico diseñado para proteger los microcircuitos de memoria de los incendios de alta temperatura que suelen iniciarse tras un accidente del reactor.

Las cajas negras modernas tienen una capacidad y una resistencia a los impactos mucho mayores que los primeros modelos, pero la FAA sigue instando mejoras. Recientemente amplió la lista de lecturas instrumentales a almacenar en los registradores de datos de vuelo. También ha propuesto que cada grabadora de voces de cabina esté equipada con una fuente de alimentación de respaldo para que pueda seguir funcionando aunque se averíen los circuitos eléctricos de la aeronave.

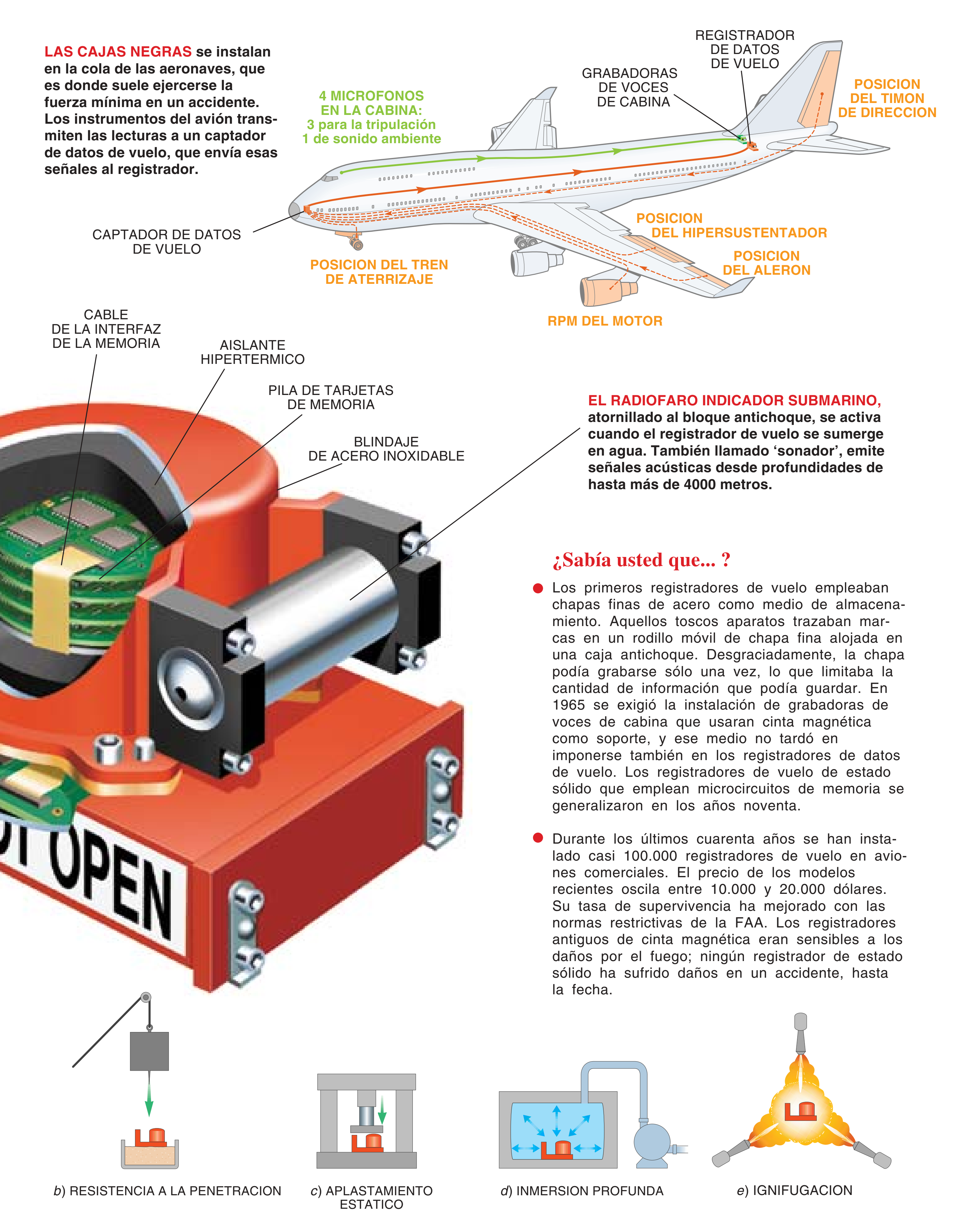
LOS REGISTRADORES DE ESTADO SOLIDO son más robustos que los aparatos primitivos, pues no contienen piezas móviles. En el modelo representado, los microcircuitos de memoria flash se disponen en una pila de tarjetas de memoria en el centro de un bloque cilíndrico antichoque.

EN LAS PRUEBAS DE CERTIFICACION se asegura que los registradores de vuelo son resistentes al choque, reproduciendo las extremas condiciones de un accidente aéreo. En la prueba de impacto (*a*), una pistola de gas lanza el registrador contra un blanco de aluminio, produciendo una fuerza máxima de 3500 g. En la prueba de resistencia a la penetración (*b*), se deja caer sobre el aparato, desde tres metros de altura, una masa de 225 kg provisto de una punta de acero templado. En la prueba de aplastamiento estático (*c*), un actuador aplica una compresión de casi 2300 kilogramos-fuerza. En la prueba de inmersión a gran profundidad (*d*) el registrador debe resistir 24 horas en una cámara llena de agua marina a presión. En la prueba de ignifugación (*e*), se le somete a llamas de 1100 °C.



a) IMPACTO

LAS CAJAS NEGRAS se instalan en la cola de las aeronaves, que es donde suele ejercerse la fuerza mínima en un accidente. Los instrumentos del avión transmiten las lecturas a un captador de datos de vuelo, que envía esas señales al registrador.



EL RADIOFARO INDICADOR SUBMARINO, atornillado al bloque antichoque, se activa cuando el registrador de vuelo se sumerge en agua. También llamado 'sonador', emite señales acústicas desde profundidades de hasta más de 4000 metros.

¿Sabía usted que... ?

- Los primeros registradores de vuelo empleaban chapas finas de acero como medio de almacenamiento. Aquellos toscos aparatos trazaban marcas en un rodillo móvil de chapa fina alojada en una caja antichoque. Desgraciadamente, la chapa podía grabarse sólo una vez, lo que limitaba la cantidad de información que podía guardar. En 1965 se exigió la instalación de grabadoras de voces de cabina que usaran cinta magnética como soporte, y ese medio no tardó en imponerse también en los registradores de datos de vuelo. Los registradores de vuelo de estado sólido que emplean microcircuitos de memoria se generalizaron en los años noventa.

- Durante los últimos cuarenta años se han instalado casi 100.000 registradores de vuelo en aviones comerciales. El precio de los modelos recientes oscila entre 10.000 y 20.000 dólares. Su tasa de supervivencia ha mejorado con las normas restrictivas de la FAA. Los registradores antiguos de cinta magnética eran sensibles a los daños por el fuego; ningún registrador de estado sólido ha sufrido daños en un accidente, hasta la fecha.

b) RESISTENCIA A LA PENETRACION

c) APLASTAMIENTO ESTATICO

d) INMERSION PROFUNDA

e) IGNIFUGACION

Matemática

Rigor y trivialidad

APOLLONIUS OF PERGA. CONICS. BOOKS I-III. Edición preparada por Dana Densmore. Traducción de R. Catesby Taliaferro, dibujos de William H. Donahue e introducción de Harvey Flaumenhaft. Green Lion; Santa Fe, 1998. **AL-KHAYYAM MATHÉMATICIEN,** por R. Rashed y B.Vahabzadeh. Editions Albert Blanchard; París, 1999. **SQUARING THE CIRCLE. THE WAR BETWEEN HOBBES AND WALLIS,** por Douglas M. Jesseph. The University of Chicago Press; Chicago, 1999.

EULER. FOUNDATIONS OF DIFFERENTIAL CALCULUS. Traducción y nota previa de John D. Blanton. Springer Verlag; Nueva York, 2000. **LINEAR DIFFERENTIAL EQUATIONS AND GROUP THEORY FROM RIEMANN TO POINCARÉ,** por Jeremy J. Gray. Birkhäuser; Basilea, 2000. **BRIEFTAGEBUCH ZWISCHEN MAX PLANCK, CARL RUNGE, BERNARD KARSTEN, UND ADOLF LEOPOLD.** Edición preparada por Klaus Hentschel y Renate Tobies. ERS Verlag; Berlín, 1999.

GÖDEL: UNE RÉVOLUTION EN MATHÉMATIQUES, por André Delessert. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes; Lausanne, 2000. **BETWEEN LOGIC AND INTUITION. ESSAYS IN HONOR OF CHARLES PARSONS.** Edición preparada por Gila Sher y Richard Tieszen. Cambridge University Press; Cambridge, 2000. **THE APPLICABILITY OF MATHEMATICS AS A PHILOSOPHICAL PROBLEM,** por Mark Steiner. Harvard University Press; Cambridge, 1998.

La matemática constituye el lenguaje de la ciencia y su crisol más exigente. Algunos recelan incluso de otras formulaciones. Sabida es la alergia de Gauss a la filosofía. “Cuando un filósofo afirma algo correcto, suele ser trivial, y cuando sostiene algo que no es trivial acostumbra ser erróneo”, sentenció. Mas, con el grado enorme de complejidad que han adquirido las ciencias exactas, ¿hasta qué punto puede tomárselas por juez? Dificultad de la que ya se quejaba Kepler: “Si alguien piensa que la obscuridad de esta presentación (la *Astronomia Nova*) se debe a la perplejidad de mi mente... le invito a que lea las *Cónicas* de Apolonio. Verá que hay materias que ninguna cabeza, por poderosa que sea, es capaz de explicar las cosas de suerte que se entiendan de corrido. Se necesita reflexión y un profundo pensamiento de lo que se dice.”

Para ahorrarnos tales quebraderos Dana Densmore, R. Catesby Taliaferro, William H. Donahue y Harvey Flaumenhaft han sumado fuerzas (*Apollonius of Perga. Conics. Books I-III*). Medio siglo después de que floreciera Euclides y 25 años tras el nacimiento de Arquímedes, es decir, en torno al año 250 a.C, vino al mundo Apolonio. Escribió, además de los ocho libros de las *Cónicas*, sobre óptica y astronomía, siempre desde un planteamiento geométrico, que influyó en Ptolomeo.

¿Qué sabían los alejandrinos de su tiempo sobre las secciones cónicas? Obtenían las curvas en un plano que cortaba un cono recto; luego, las caracterizaban mediante el diámetro, único, que tendía ángulos rectos con las cuerdas que bisecaba. A ese diámetro único Apolonio le llama “eje”, y es sólo uno de los diámetros que emplea. El dibuja las curvas en un plano que corta cualquier cono (sea recto u oblicuo); las caracteriza mediante cualquier diámetro (sea el exclusivo que forma ángulos rectos con las cuerdas que corta o sea el diámetro que las corte oblicuamente). Introdujo las curvas que, siguiendo su terminología innovadora, vinieron a llamarse “parábola”, “hipérbola” y “elipse”. Adopta un método indirecto de exposición, donde no se plantean problemas, sino que se aportan soluciones harto difíciles de entender si no desciframos las cuestiones a que responden.

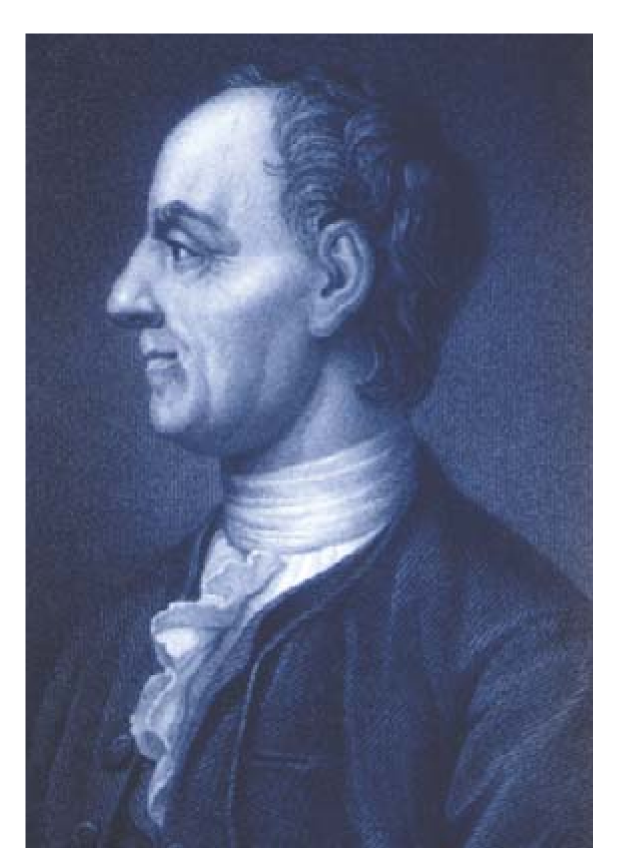
La manipulación de las proporciones se funda, siguiendo a Euclides, en la relación entre números y magnitudes. De los *Elementos* euclidianos hemos de partir para comprender el primer libro de las *Cónicas*. Con la ayuda de Pappus y Diofanto avanzaremos en la intelección del segundo y tercero. Al ocuparse de las figuras sólidas en el libro XI de los *Elementos*, Euclides define el cono generándolo: la figura abarcada cuando, tomando uno de los lados del ángulo recto de un triángulo rectángulo, mantenemos fijo el lado y transportamos el triángulo en torno a la misma posición desde donde empezamos a movernos. El eje del cono es la recta que permanece fija cuando gira el triángulo; y la base es el círculo barrido por la línea en su recorrido. También Apolonio obtiene un cono generándolo. Pero da la superficie cónica antes de definir el cono. No todos los conos, deduce, son rectos. Introduce cortes en cualquier ángulo (oblicuo o recto) en cualquier cono (oblicuo o recto). Un cono recto es radialmente simétrico, no así el oblicuo. Tras Descartes, las secciones cónicas pasaron a estudiarse algebraicamente.

Pero no fue Descartes el primero en plantearse la geometría *more* algebraico (*Al-Khayyam Mathématicien)*. Personaje de leyenda, Umar al-Khayyam (1048-1131) nació y murió en Nayshabur. Tuvo una doble formación, matemática y filosófica. Filósofo avicenista, fue el primer matemático que pensó en una geometría algebraica, desarrollada por su seguidor Sharaf al-Din al-Tusi. Al-Khayyam había estudiado los escritos de al-Haytham (nuestro Alhacén) y, en particular, un tratado donde resuelve cómo hallar cuatro segmentos entre dos segmentos dados tales que los seis se encuentren en proporción continua.

En este libro Rashed ha agavillado todos sus trabajos matemáticos, que ilumina con precisos comentarios históricos y matemáticos. Se recogen, pues, el *Tratado del álgebra y de al-muqabala, Tratado sobre la división de un cuarto de círculo* y *Comentario sobre las dificultades de ciertos postulados de la obra de Euclides*. Por dos veces al-Khayyam relata los comienzos de la geometría algebraica: en su memoria sobre la división de un cuarto de círculo y en su tratado de álgebra. Evoca, entre los precursores, las aportaciones de al-Mahani, al-Khazin y Abu al-Jud ibn al-Layth. Este último pensó en una clasificación de las ecuaciones cúbicas antes de determinar las curvas cónicas; Elabora una teoría de

las ecuaciones de grado menor o igual que 3 y generaliza las ecuaciones de los dos primeros grados para incluir las ecuaciones cúbicas. Pero al-Khayyam encuentra un primer obstáculo que resultará, a la postre, una bendición. Para las ecuaciones de los dos grados iniciales al-Khwarizmi, a comienzos del siglo IX, había dado soluciones por raíces, que justificó geométricamente. En la segunda mitad de esa misma centuria, Thabit ibn Qurra aportó la traducción geométrica completa. Mas, para las ecuaciones cúbicas no se conocía todavía la solución por radicales. Ese obstáculo no pequeño exige de al-Khayyam que refunda las condiciones de posibilidad del proyecto de al-Khwarizmi.

Esbozar una teoría de las ecuaciones de grado menor o igual que 3 es, ante todo, enriquecer los términos primitivos heredados de los predecesores algebristas y fundar un cálculo geométrico susceptible de llevar a su solución. Al-Khwarizmi y sus sucesores habían aportado las nociones de incógnita, su cuadrado, potencias superiores, expresiones polinómicas y operaciones aritméticas sobre éstas, es decir, la ecuación. En ese terreno al-Khayyam no tenía nada que añadir. Pero faltaba por atribuir un sentido geométrico, sea en el plano, sea en el espacio. El concepto fundamental que hace posible ese paso es el de unidad de medida que, si está convenientemente definido en relación con el de dimensión, permite la aplicación de la geometría al álgebra, y así la elaboración de la primera teoría geométrica de las ecuaciones algebraicas. El partido geométrico tomado por al-Khayyam le lleva no sólo a traducir las ecuaciones en términos geométricos, sino también a dar una demostración, dos a veces, de igual naturaleza para cada una de ellas. El proceso seguido es sistemático. Por ejemplo, en el caso más sencillo en que $x^2 = c$, tras haber obtenido la solución por raíz cuadrada, construye un cuadrado igual a un área dada con ayuda de la proposición II.14 de los *Elementos* de Euclides. Resolvió las ecuaciones de tercer grado cuando admitían tres soluciones positivas, pero no pudo tomar en consideración soluciones negativas o complejas.



Retrato de Leonhart Euler, autor desconocido

Otros problemas había dejado abiertos la matemática de la antigüedad clásica. Tres en particular: construir un cuadrado de área igual a la de un círculo dado (*Squaring the Circle. The War between Hobbes and Wallis*), dividir un ángulo en tres secciones iguales y duplicar un cubo. Sabemos hoy que los problemas son insolubles con regla y compás, pero eso se ignoraba en tiempos de Hobbes, aunque los repetidos fracasos obtenidos en el empeño hicieron cierta mella. A mediados del siglo XVII, muchos habían concluido que la cuadratura del círculo, por lo menos, no podía solucionarse con la geometría clásica. El origen del problema de la cuadratura del círculo se asocia a la búsqueda de áreas de figuras no lineales. Con la geometría euclídea podemos construir un cuadrado de área igual a cualquier figura rectilínea. En el caso de la cuadratura del círculo, dado un círculo de radio r, se trata de dibujar un cuadrado igual en área a aquél, valiéndonos sólo de recursos euclídeos.

La idea de trisecar un ángulo arbitrario hunde sus raíces en la construcción de polígonos y sólidos regulares. La geometría euclídea permite construir polígonos regulares de 2^n lados, para n entero mayor que 1. Además, con métodos planares podían dibujarse un triángulo equilátero y un pentágono regular; en ellos se apoya Euclides para construir los cinco "sólidos" platónicos (tetraedro, cubo, octaedro, dodecaedro e icosaedro). ¿Podían construirse otras figuras y sólidos regulares? La división del ángulo desempeña en ello un papel crucial; si además pudiera dividirse el círculo en cualquier número de arcos iguales, uniendo los puntos sucesivos de división por cuerdas tendríamos cualquier polígono regular deseado. La bisección de un ángulo no encerraba ninguna dificultad, pero la trisección era harina de otro costal.

Se llamaba "problema deliano" el de la construcción de un cubo cuyo volumen doblara el de otro. Según la leyenda, el oráculo de Delos pidió que el altar cubiforme del templo se doblara. La irresolubilidad del problema deliano (con medios euclídeos) deriva de la misma clase de dificultad que impide la cuadratura del círculo.

En esa piedra tropezó, año tras año, Thomas Hobbes. Lo curioso del caso es que él comenzó rechazando la posibilidad de cuadrar el círculo. En 1645, John Pell escribió a Charles Cavendish pidiéndole ayuda en la controversia que mantenía con Christian Severin Longborg, sobre la cuadratura. Cavendish pasó la solicitud a Hobbes, cuya demostración se publicaría en la obra de Pell *Controversiae de vera circuli mensura... Prima pars* (1647), junto con las contribuciones de René Descartes, Bonaventura Cavalieri y Gilles Personne de Roberval.

Hobbes, andando el tiempo, mudó de opinión y sostuvo con Wallis una larguísima controversia, objeto del libro de Jesseph. Cerca del final de sus días, un Hobbes octogenario detallaba un rosario de "aportaciones" que le hacían merecedor de un puesto de honor entre los grandes de su siglo. "En matemática, corrigió algunos principios de geometría. Resolvió algunos de los problemas más difíciles, abordados en vano por una pléyade de máximos geómetras desde los comienzos de la geometría, a saber: mostrar que una línea recta era igual al arco de un círculo, y un cuadrado igual al área de un círculo, y esto por varios modos y en diversos libros; dividir un ángulo en una pro-

Cartografía del cielo

3-D ATLAS OF STARS AND GALAXIES, por Richard Monkhouse y John Cox. Springer Verlag; Londres, 2000.

Los astros aparecen proyectados en la bóveda celeste y, a simple vista, no es posible obtener una idea clara de sus distancias. Medir distancias a estrellas y galaxias, para poder así desproyectar sus imágenes, ha sido una de las tareas en que más empeño han puesto los astrónomos a lo largo de la historia. Uno de los mayores avances en la medida de distancias astronómicas lo supuso el lanzamiento en 1989 por parte de la Agencia Espacial Europea (ESA) del telescopio espacial "Hipparcos". Entre 1989 y 1993 Hipparcos realizó entre 100 y 150 medidas de las posiciones de unas 100.000 estrellas.

La ausencia de las distorsiones que la atmósfera introduce en las medidas desde el suelo hizo posible que Hipparcos alcanzase una precisión de ±1 milisegundo de arco en la medida de posiciones estelares (desde Tierra las mejores precisiones alcanzadas por las observaciones ópticas están en torno a ±8 milisegundos de arco), lo que se tradujo en una precisión sin precedentes en la medida de distancias por el método de la paralaje trigonométrica. Este método se basa en que la Tierra, al moverse a lo largo de su órbita, ofrece diferentes perspectivas de una estrella cercana respecto del fondo de estrellas más lejanas. Con los datos obtenidos por Hipparcos se elaboró el catálogo más completo de distancias estelares hasta la fecha.

El recién editado atlas de Monkhouse y Cox representa estrellas y galaxias en 3 dimensiones gracias a la visualización de la tercera dimensión (la distancia) mediante estereogramas. Las distancias estelares están tomadas del catálogo Hipparcos mientras que las distancias a las galaxias se toman del muy completo catálogo extragálactico del Centro de Astrofísica de Harvard. El atlas contiene 3 colecciones de mapas. Unos mapas "locales" incluyen todas las estrellas hasta una distancia de unos 25 parsec (unos 80 años-luz). Los mapas "regionales" muestran las estrellas más brillantes hasta una distancia de unos 10.000 parsec. Finalmente, los mapas de galaxias muestran las más brillantes (hasta magnitud 15) del universo local.

Los estereogramas han de ser visualizados mediante unas "gafas" (un filtro rojo para un ojo y un filtro azul para el otro). Aunque al principio no resulta sencillo, con la práctica mejora poco a poco la capacidad para obtener la sensación de profundidad. Los mapas de galaxias son los que resultan más difíciles de visualizar, pero al final es posible apreciar la existencia de estructuras a muy gran escala, como la llamada "Gran Muralla": una enorme agrupación de galaxias en la constelación de Virgo.

Galaxia de Andrómeda

Hemos de señalar que el método utilizado para la representación impone que la escala de distancias esté extremadamente comprimida y, aunque en principio los estereogramas pudiesen servir para estimar las distancias a los objetos representados, en la práctica la precisión obtenida no es buena. Los mapas 3-D tampoco suplen las funciones de los mapas estelares tradicionales, pues no contienen los nombres de los objetos, separaciones entre constelaciones, etc. Un atlas estándar, con los nombres de los objetos más brillantes marcados en él, sirve de guía a los estereogramas y podría ser interesante en sí mismo, pero la verdad es que este atlas resulta un tanto incompleto al no contener las nebulosas oscuras ni las brillantes. Más que un libro de consulta o de referencia, este atlas 3-D es una curiosidad. Visualizar con esta técnica un par de mapas en ese pequeño escenario virtual en el que parecen flotar estrellas o galaxias será una diversión amena para astrónomos aficionados o profesionales. El libro encontraría un buen lugar en una biblioteca de astronomía que ya tenga cubiertas las necesidades básicas. Pero, sobre todo, este atlas es una ingeniosa ilustración de los magníficos resultados obtenidos por el telescopio Hipparcos y, en términos más generales, de la maestría alcanzada en las técnicas de medir distancias. —RAFAEL BACHILLER

porción determinada; hallar la razón entre el cubo y la esfera; hallar cualquier número de proporciones medias continuas entre dos líneas dadas; describir un polígono regular con cualquier número de lados; hallar el centro de gravedad del cuadrante de un círculo y su subtensa; hallar los centros de gravedad de todos los tipos de parábolas."

Estaba convencido de que su reforma de la geometría resolvería cualquier problema. En su opinión, los fracasos de los geómetras no partían de una imposibilidad intrínseca de los problemas, sino del método incorrecto seguido. La insistencia en el método abarca su obra entera, se ocupe de política, de filosofía natural o de matemática. Método vinculado a la estructura deductiva de la geometría, en cuyo modelo quería ahormar su creación filosófica.

Su obsesión por el "prestigio" empezó a manifestarse en 1655, con la publicación del *De corpore*, donde, entre otros temas de filosofía especulativa, expuso su solución a la cuadratura del círculo. Pero no le llegó la gloria, sino un sonado varapalo de John Wallis, profesor de geometría en Oxford. A su alegada cuadratura y otros "éxitos geométricos" Wallis respondió con su *Elenchus Geometriae Hobbianae*, donde señalaba numerosos errores técnicos. Hobbes replicó en un apéndice a la versión inglesa del *De corpore*, titulado *Six Lessons to the Professors of the Mathematiques* (1656). Las exigencias retóricas de su réplica llevaron a Hobbes a criticar el latín de Wallis y poner objeciones matemáticas de su *Arithmetica Infinitorum* de 1656, un texto que ejerció poderosa influencia, donde empleaba el "método de los indivisibles". Wallis no tardó mucho en contrarreplicar. Ni Hobbes en volver a la carga.

Ante el desprecio recibido en la *Mathesis Universalis*, donde Wallis exponía la naturaleza de la matemática y presentaba las ramas principales de la misma, contraatacó con *Examinatio et Emendatio Mathematicae Hodiernae* y presentó 68 proposiciones centradas en la cuadratura del círculo y en numerosos problemas geométricos más. Hobbes insistía en su supuesta eminencia matemática al año siguiente (1661), en una solución anónima sobre el problema de la duplicación del cubo, publicada en París bajo el título *La Duplication du Cube par V.A.Q.R.* Wallis reconoció al autor y en carta abierta desmenuzó su error. Nunca se hizo más cierto el apotegma de Gauss.

La matemática cobra un ímpetu impresionante en la Ilustración con Leonhart Euler, discípulo aventajado de Johannes Bernoulli (*Euler. Foundations of Differential Calculus*). No hay campo de la disciplina sin su sello: el cálculo, las ecuaciones diferenciales, la geometría analítica y diferencial de curvas y superficies, la teoría de números, series y cálculo de variaciones. Al precálculo y análisis elemental abordados en su *Introductio in Analysin Infinitorum* (1748), les siguieron obras de más fuste sobre cálculo: las *Institutiones Calculi Differentialis* (1755) y las *Institutiones Calculi Integralis* (1768-70).

En dos partes se dividen las *Institutiones Calculi Differentialis*, a saber, la teoría del cálculo y sus aplicaciones. John D. Blanton presenta la traducción, del latín al inglés, de la primera parte, según el texto correspondiente de las *Opera Omnia* editadas por Gerhard Kowalewski.

A Euler se debe buena parte de la fijación de los símbolos matemáticos, tan avanzada fue su notación. Recuérdese, a modo de ejemplo paradigmático, que introdujo en su célebre fórmula $e^{\pi i} + 1 = 0$ las tres letras simbólicas. Suyas fueron también las expresiones f(x) por “función de x”, Δx por incremento de x, etc. Aquí el traductor se ha limitado a sustituir xx por x^2, lx por ln$x$, cosx^2 por cos^2x y leves adaptaciones más.

Sobre las ecuaciones diferenciales versa el capítulo nono de estos *Fundamentos del cálculo*, es decir, de la explicación de las funciones de x que no están definidas explícita, sino implícitamente mediante la relación de x con la función y. El concepto de función lo había formulado su tutor Bernoulli. Euler la entiende como una expresión analítica formada a partir de una magnitud variable y constantes; prosigue con la función de varias variables, la función algebraica y las funciones transcendentales.

En torno a la teoría geométrica de funciones creada en el siglo XIX gira *Linear Differential Equations and Group Theory from Riemann to Poincaré*, libro para iniciados revisado y ampliado en esta segunda edición. Con dicha explicación se buscaba la unidad de la matemática y hacia ella convergieron la ecuación hipergeométrica y las asociadas ecuaciones diferenciales lineales, la teoría de grupos y la geometría no euclidiana, desarrollos principales de Riemann, Fuchs, Dedekind, Klein y Poincaré, entre otros.

A la expresión que dio Euler, en sus *Institutiones Calculi Integralis* y en otros lugares, de la ecuación diferencial y de las series de potencia que representan una solución de la misma, se las conoce por ecuación hipergeométrica y series hipergeométricas. Euler demostró que las series potenciales satisfacían la ecuación diferencial, y, a la inversa, que el método de coeficientes indeterminados llevaba a las series de potencias como una solución de la ecuación diferencial.

La ecuación hipergeométrica, $x\,(1-x)\,d^2y/dx^2 + (c-(a+b+1)x)\;dy/dx - aby = 0$, había sido estudiada por Gauss en 1812. Esta ecuación diferencial lineal ordinaria admite soluciones explícitas de series potenciales. El trabajo inicial de Gauss lo generalizó, 45 años más tarde, Riemann en un artículo donde aclaraba la idea de continuidad analítica de las soluciones en torno a sus singularidades en el dominio complejo. Merced a ese planteamiento monodrómico se lograba una intelección global de las soluciones de la ecuación hipergeométrica. Fuchs la generalizó en 1865 a las ecuaciones diferenciales lineales ordinarias de orden n. Sugería que podía aislarse una subclase, constituida por ecuaciones diferenciales, cuyas soluciones fueran todas funciones algebraicas. Este problema fue abordado en los años setenta por Schwarz (para la ecuación hipergeométrica), Fuchs, Gordan y Klein (para la ecuación de segundo orden) y Jordan (para la ecuación de orden n). Se valieron de métodos geométricos (Schwarz y Klein), teóricos-invariantes (Fuchs y Gordan) o teóricos de grupos (Jordan).

Los teóricos de grupos fueron los que obtuvieron un éxito más resonante; partían del enfoque monodrómico, tomando todas las transformaciones monodrómicas, es decir, todas las transformaciones analíticas de una base de soluciones bajo continuidades analíticas en torno a todas las trayectorias del dominio, y considerando este conjunto en su totalidad como un grupo.

La hipergeométrica contiene muchas ecuaciones interesantes como casos especiales; en particular la ecuación de Legendre, que se satisface para los períodos K y K' de integrales elípticas consideradas como funciones de módulo k^2. Klein se empeñó en reformular la teoría de las funciones modulares y las transformaciones modulares sin recurrir a la teoría de las funciones elípticas. Ese intento lo había cumplido, casi por comple-



Hermann Amandus Schwarz (1843-1921)



Carl Runge (1856-1927)

to, Dedekind en 1878, cuando construyó una teoría de las transformaciones modulares sobre la idea del reticulado de períodos de una función elíptica.

Sólo Gauss se preocupó de hallar aplicaciones científicas de sus resultados en la teoría de las ecuaciones diferenciales. Riemann, profundamente interesado en física, no vio en ésta ningún papel para sus funciones *P*. Klein y Poincaré confinaron su labor al dominio de la matemática pura. La escuela de Berlín, capitaneada por Weierstrass y Fuchs, prestará escasa atención a la física.

Un discípulo de esa escuela, no obstante, dio un giro a la tradición (*Brieftagebuch zwischen Max Planck, Carl Runge, Bernard Karsten, und Adolf Leopold*). Carl David Tolmé Runge nació en Bremen en 1856. Inició su formación superior en la Universidad de Munich, que prosiguió en Berlín, donde estudió matemática con Weierstrass y Kronecker. En 1886 fue nombrado profesor de matemática en la Escuela Técnica Superior de Hanover. Quien hasta entonces se había consagrado a problemas de geometría analítica, teoría de números y álgebra, empezó a interesarse, con Heinrich Kayser, por los espectros de los elementos químicos.

En 1904 acepta la primera plaza de matemática aplicada, que se crea en la Universidad de Göttingen. Trabajó allí sobre el efecto Zeeman anómalo con Woldemar Voigt. También colaboró con Karl Schwarzschild. Runge puso la matemática al servicio de la física emergente.

La observación del efecto Zeeman permitía determinar la multiplicidad de una línea espectral, emitida por un átomo sin perturbar, incluso cuando (en ausencia de campo magnético) sólo se conociesen los multipletes más intensos. Runge obtuvo resultados de las series tripletes (secundarias) y espectros dobletes de diversos elementos. Y, sobre todo, dio una relación numérica entre las separaciones espectrales. Su nombre va ligado a la ley fundamental del desdoblamiento magnético de las líneas espectrales. Todas las separaciones, reconoció, son múltiplos racionales de la separación fundamental.

Las cartas reimpresas en este volumen fueron escritas por Max Planck, Runge, Bernhard Karsten y Adolf Leopold. En 1875 pertenecían a la Sociedad Académica Coral de Munich y acordaron cartearse y recoger en un dietario tales misivas. De las 120 reproducidas, Runge escribió 79, Planck 37, y Karsten y Leopold las pocas restantes. Estriba su interés principal en que revelan el talante humano de los protagonistas.

Cuando Runge muere en 1927, en Viena se respiran aires de renovación epistemológica (*Gödel: une Révolution en Mathématiques*). Delessert apunta lejos y, aunque centrado en la noción de número, se remonta a los presocráticos para situar la figura de Kurt Gödel y justificar así qué es lo que sus teoremas tenían que revolucionar. En su repaso a uña de caballo distingue tres períodos en la historia de la matemática: uno griego hasta la Edad Media, en que la matemática presenta una connotación cósmica, vinculada a la belleza de la proporción; un segundo intervalo que abarca del siglo XVI al XVIII, de sometimiento a la física, y un tercero ontológico, que empieza en el XIX, de ensimismamiento.

Gödel, nacido en 1906, publica a los veinticuatro años su tesis doctoral, la demostración de lo que hoy se conoce por *teorema de completud* de Gödel. Al año siguiente, en 1931, establece los *teoremas de incompletud* de Gödel. Si el trabajo de 1930 pasó sin pena ni gloria, el de 1931 levantó una oleada de comentarios. Se interpretó como una limitación interna de las matemáticas, la presencia en su seno de un fracaso irremediable. A su grupa, hubo quien puso en duda la consistencia de la matemática; otros la negaron sin rodeos. La historia desmentiría todos esos futuros apocalípticos. En los últimos setenta años se ha avanzado más en matemática que en el curso de los milenios que le precedieron.

Con la publicación en 1899 de sus *Grundlagen der Geometrie* (Fundamentos de la geometría) David Hilbert se proponía dar una axiomática completa de la geometría euclidiana, plana en particular. Hilbert hubiera querido mostrar que sus 16 axiomas eran independientes en sentido estricto, es decir, que cada uno de ellos podía ser sustituido por su negación sin introducir contradicciones en el sistema modificado. Desgraciadamente eso se reveló imposible para algunos de ellos. En efecto, los 16 axiomas de Hilbert se sucedían en un orden riguroso, uno no tenía sentido si los precedentes no se satisfacían. Por tanto, ninguno de ellos podía sustituirse por su negación. Pudo, sin embargo, establecer la independencia de los axiomas más notables. El axioma de las paralelas, entre ellos.

En el congreso de matemáticos celebrado en París en 1900, Hilbert re-

tomó la tesis de Cantor según la cual la existencia de un objeto matemático equivale a la no contradicción de las condiciones que lo definen. Entre los famosos problemas que sometió a la comunidad matemática, el segundo concernía a la no contradicción de la aritmética. Para consumar la tarea acometida en los *Grundlagen*, le convenía mostrar que la axiomatización de la aritmética —la de Peano, por ejemplo— era consistente.

En su tesis doctoral, titulada *Die Vollständigkeit der Axiome des logischen Funktionkalküls* ("La completud de los axiomas del cálculo lógico funcional", es decir, del cálculo lógico de primer orden) Gödel responde de manera positiva a la cuestión de si el formalismo de primer orden satisface todas las exigencias del razonamiento matemático. Su respuesta será negativa a la segunda cuestión hilbertiana, la de si este formalismo permite establecer la no contradicción de los axiomas de la aritmética y de los axiomas conjuntistas, en el artículo de 1931, *Über formal unentscheidbare Sätze der Principia Mathematica und verwandter Systeme I* ("Sobre proposiciones formalmente indecidibles de los *Principia Mathematica* y sistemas similares"). El primer resultado se sustancia, como adelantamos, en el teorema de completud de Gödel; el segundo, en los teoremas de incompletud de Gödel.

En su versión original, el teorema de completud concierne a la lógica de primer orden. Los conjuntos considerados son siempre conjuntos de signos, términos y fórmulas de un lenguaje L y son siempre finitos o numerables. Enuncia: a) la condición necesaria y suficiente para que un sistema formal de primer orden (L,S) sea consistente es que admita un modelo conjuntista; b) si (L,S) es una teoría de primer orden, los enunciados derivables en (L,S) son exactamente los que se satisfacen en todo modelo conjuntista de (L,S). El segundo artículo, quicio de la lógica moderna, prueba que los sistemas formales de la matemática clásica son incompletos; para cada sistema formal podía construirse una sentencia indecidible. Demuestra, asimismo, la imposibilidad de probar la consistencia de un sistema formal dentro del mismo.

Charles Parsons se cuenta entre los exégetas contemporáneos de Gödel (*Between Logic and Intuition. Essays in Honor of Charles Parsons)*. En su honor se ha preparado una colección de ensayos que ofrecen una panorámica de las tendencias principales en filosofía de la lógica y filosofía de la matemática: de la semántica y paradojas de las teorías de conjuntos a la distinción entre clase y conjunto, pasando por fundamentos de la teoría de conjuntos, intuición matemática y otros.

Vale la pena leer las páginas inéditas de Hilary Putnam sobre paradojas semánticas y paradojas de la teoría de conjuntos. O las de George Boolos, quien poco antes de su muerte se preguntaba si habíamos de creer en la teoría de conjuntos, entendiendo por tal la teoría de Zermelo-Fraenkel con los axiomas de elección y fundamentación.

Confiesa Putnam que a través de los años fue observando que los teóricos de conjuntos se decantaban por el platonismo o por el formalismo, ambos ismos extremados, aunque los formalistas parecían hallarse en minoría. "He visto también que los teóricos de conjuntos de ambas tendencias se hallan convencidos de que no existen ya problemas pendientes. Pero hay filósofos que continúan buscando una alternativa al formalismo y al platonismo." Y en busca de una vía media dialoga críticamente con Gödel y Quine.

"Apresúrome a decir que no intento defender la opinión de que la paradoja de Russell es irresoluble. Igual que creo que, en cierto sentido, las jerarquías son la respuesta a la paradoja del mentiroso, del mismo modo creo que, en un sentido similar, las jerarquías son la respuesta a la paradoja de Russell (y a la paradoja de Burali-Forti, etc.). Pero la jerarquía de metalenguajes y la jerarquía de interpretaciones de los usos de verdad en el lenguaje natural son intrínsecamente jerarquías alambicadas. A la postre son "paradójicas", aun cuando no sean formalmente contradictorias. Una situación no muy distinta es la que se presenta en teoría de conjuntos."

Del naturalismo científico de Quine se aparta Mark Steiner (*The Applicability of Mathematics as a Philosophical Problem*), para quien la mecánica cuántica no es compatible con esa tesis filosófica y sí con una suerte de analogismo matemático. Distingue entre problemas semánticos que surgen del supuesto hiato entre objetos matemáticos y mundo físico, problemas descriptivos que surgen del uso de la matemática para describir la naturaleza y problemas epistemológicos que surgen del uso de la matemática para descubrir las descripciones genuinas.

A finales del siglo XIX, la física tenía que apuntalar el conocimiento de lo inobservable, las leyes del mundo atómico, distintas de las que gobiernan el mundo macroscópico. Cierto es que, como señaló Peirce, una vez conjeturadas las leyes, podían verificarse indirectamente sometiendo a prueba sus consecuencias. Pero antes tenían que intuirse, y Peirce no era muy optimista sobre la posibilidad de que la mente humana tuviera tal capacidad intuitiva sobre leyes de objetos que no desempeñaban un papel en la vida diaria.

¿Cómo se llegó, pues, a las leyes atómicas y subatómicas de la naturaleza? Por analogía matemática. "Ciertamente no sólo por analogía matemática y no sólo al problema atómico." Newton y Maxwell se habían servido ya de ese recurso. Pero en el primer tercio del siglo XX la física cuántica dependía de las analogías matemáticas porque no quedaba otra alternativa. Se buscaban explicaciones que guardaran similaridad matemática con las leyes a establecer, refinar o sustituir. Incluso allí donde las analogías adquirían la forma de modelos físicos (el sistema planetario del átomo de Bohr), los modelos operaban como funciones matemáticas. Como señalaría Dirac, el significado profundo del "principio de correspondencia" de Bohr estribaba en que las leyes cuánticas debían tener la misma forma matemática que las leyes clásicas.

Los físicos se valieron de las relaciones entre estructuras y notaciones de la matemática para plantear sus hipótesis. Lo que no obsta para que, sin un aluvión previo de datos, ninguno hubiera formulado teorías sólidas y para que ninguna teoría descubierta deba confirmarse por corroboración empírica. La tesis de Steiner es que la información empírica se canalizó hacia nuevos casos a través de la clasificación matemática. Valga de ejemplo paradigmático la ley del inverso del cuadrado, explícita en la gravedad (ley de Newton), la electrostática (ley de Coulomb) y la óptica (la intensidad de una onda esférica de luz). La precisión experimental de estas leyes impresionó a Wigner. Feynman confesaba: "No deja de sorprenderme que por medio de la matemática podamos predecir qué acontecerá, que no es otra cosa que seguir reglas que nada tienen que ver con el objeto original."

LUIS ALONSO

NEXOS

James Burke

La última palabra

En 1775, la que fuera casa de Isaac Newton en Londres estaba en manos de un organista, cuya hija, Fanny Burney, con sólo 23 años, compuso una novela delicadamente satírica sobre las costumbres de las clases medias: *Evelina o la entrada de una joven dama en el mundo*. Demasiado empalagosa para mi paladar, se vendió como rosquillas tras su publicación anónima en 1778.

Fanny sedujo de inmediato la fantasía de muchos (con semejante título, cabe sospechar de las intenciones de algunos compradores). De hecho, el comportamiento de uno de tan ávidos admiradores le habría llevado hoy ante el juez por acoso sexual. El corpulento Dr. Samuel Johnson quedó impresionado por la novela, pero lo estuvo aún más al descubrir que la autora era la hija de un organista amigo suyo. Se cuenta que la 'acarició en demasía'. Imagino que no debían ser muy excitantes los abrazos de un hipocondríaco gordo con un tic que hablaba solo y cuya agudeza visual era tan escasa como su higiene.

Johnson evitó probablemente el escándalo porque tenía la réplica más aguda y su lengua ácida regalaba noches de insomnio a los engreídos. Por decirlo todo, Johnson fue también un consumado escritor y compuso un diccionario de 43.500 palabras que no tuvo rival hasta la aparición del *Oxford English* (con permiso del *Webster*). En 1763 Johnson fundó en Londres, con algunos de sus compañeros de lides literarias, El Club, donde la elite se reunía con periodicidad semanal para celebrar las chispas de Johnson (que solían saltar después de la tercera botella). Hacia 1775, frecuentaba la tertulia un profesor que había redactado una brillante reseña del diccionario de Johnson en una revista escocesa. Un tal Smith.

Pero no un Smith cualquiera. Adam Smith, o "la riqueza de las naciones". El tipo que inventó la economía política, el mercado como un mecanismo autocorrector, la división del trabajo, la "mano invisible", la producción en serie y todas las razones por las que tener miedo antes de mirar el balance diario de las acciones. Resulta curioso que Smith no fuera consciente de la importancia de sus esfuerzos en ayudar a un joven mecánico, James Watt se llamaba, a conseguir un trabajo de mantenimiento en la Universidad de Glasgow. Smith pertenecía a la flor y nata intelectual de Escocia, muchos de cuyos integrantes se reunían de forma regular en Edimburgo para comer ostras y, en lo que a Smith concierne, compartir perlas de sabiduría económica. Uno de los asiduos era el hijo del tesorero municipal, James Hutton, quien, a mi juicio, nunca ha recibido justo reconocimiento en el desarrollo de la teoría de la evolución.

Hutton cuestionó la idea aceptada de una creación literal en siete días en torno al 4004 a.C., seguida del diluvio. Postuló lo que recibiría el nombre de uniformitarismo. Su *Teoría de la Tierra*, publicada en 1795, describía procesos geológicos que, como la erosión, operaban en el pasado con la lentitud con que lo hacían hoy día. Por tratarse de un ritmo parsimonioso Hutton entendía que la Tierra era más vieja de lo que podía imaginarse y, en cualquier caso, de la suficiente longevidad como para permitir a los organismos cambiar en consonancia con las condiciones mudables. Así se explica que el mentor de Charles Darwin, Charles Lyell, fuera un ferviente admirador de Hutton.

Hutton se había dedicado a temas tan rocosos estimulado por los trabajos del teólogo John Harris, quien en 1704 escribió el mejor diccionario técnico. Pero no lo suficientemente bueno, a decir de Ephraim Chambers.

En 1728, Chambers sacó a la luz su *Ciclopedia* o *Diccionario Universal de las Artes y las Ciencias* en dos volúmenes y con índices cruzados, y trazó el camino para todas las enciclopedias posteriores. En 1746 salía la quinta edición, lo que llamó la atención de un editor francés con tan buen ojo para el dinero fácil que buscó enseguida traductor. Hacia 1747, más o menos, su tercera opción fue alguien famoso por una novela pornográfica publicada ese mismo año. Por fin, en 1751, Denis Diderot empezó a cortar y pegar lo que se transformaría en la *Enciclopedia* de 28 volúmenes, una obra maestra que puso la I mayúscula a la Ilustración.

Durante un tiempo, fue coeditor de Diderot el único matemático ilegítimo, que yo sepa, bautizado con el nombre de la iglesia en cuyas escaleras fue abandonado: Jean Le Rond d'Alembert. De él baste saber que demostró que la máxima "Toda acción produce una reacción igual y opuesta" también rige para los cuerpos que se desplazan libremente. Y que su madre, Madame de Tencin, nunca lo reconoció. Estaba demasiado ocupada en los brazos del primer ministro, del regente del reino y de otros tipos importantes. Amante tan generosa presidía también uno de esos salones de conversación donde se podía temblar con el nuevo y arriesgado escepticismo; el de Bernard Le Bovier de Fontenelle, por ejemplo, quien en 1686 fantaseaba sobre planetas habitados, alunizajes y las excentricidades de la religión. De Fontenelle tuvo un eficaz continuador en Voltaire, quien escribió una sátira sobre las inquietudes de nuestro mundo vistas por un extraterrestre.

Con el tiempo, Voltaire se retiró a Ferney, Suiza. La cola de los que acudían a visitarle doblaba la manzana. Allí se apostó Uvedale Price, quien de regreso a Inglaterra inició el movimiento *Picturesque* en 1794 con su compatriota Richard Payne Knight. Ambos desataron una manía por los jardines asilvestrados y las ruinas medievales (o lo que se le pareciera), que pasó a portada cuando el mensaje de Knight "mantened el desorden de las cosas" caló en el arquitecto John Nash. Este ensució Inglaterra con asimétricos castillos almenados de imitación y con casas de campo amuralladas que llamaron la real atención del príncipe regente, gracias a quien Nash ya tuvo qué echar abajo, remodelar, estucar y dónde poner arcadas en el oeste de Londres: entre otros Regent's Park, Buckingham Palace, Marble Arch y Regent Street. Esta última calle, para unir el parque con la residencia londinense del regente de Carlton House, de la que su propietario se mostraba tan orgulloso que invitaba a personas famosas a que se dieran una vuelta por ella.

En 1815 una de estas celebridades invitadas arribó desde Hampshire. Que la hija del pastor se hubiera colado en la lista se debía a que dos años antes Jane Austen había logrado su primer éxito con *Primeras impresiones*, de quien el lector no debe haber oído porque ella le cambió el título después de tropezar con una novela cuyas últimas palabras eran, "Todo este lamentable asunto... es fruto del orgullo y el prejuicio." Escrita por alguien a quien Austen admiraba: Fanny Burney.

Y esta sí es mi última palabra.

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



LA EVOLUCION BIOLOGICA, SU RITMO Y PREDICCION, por Antoni Prevosti y Lluís Serra

La evolución puede ser muy rápida y la trayectoria seguida, repetirse. Nos lo demuestran las clinas, que nos permiten predecir las respuestas adaptativas ante perturbaciones naturales o antropogénicas.

CORREDOR DE HOMINIDOS EN AFRICA SUDORIENTAL, por Friedemann Schrenk y Timothy G. Bromage

Entre dos importantes yacimientos muy alejados se abre una ventana que permite reconocer la posible angosta ruta seguida por los prehomínidos y hombres primitivos africanos arrojando luz sobre su sorprendente movilidad.

OPERACION A CORAZON ABIERTO, por Cornelius Borst

La intervención quirúrgica aortocoronaria por desviación del flujo salva muchas vidas. Se han desarrollado dos nuevas técnicas gracias a las cuales el proceso gana en seguridad y economía.

EL PODER DE LOS MEMES, por Susan Blackmore

Las conductas e ideas que pasan de unas personas a otras por imitación —los llamados memes— podrían haber influido en los genes en su determinación del ser humano.

DECISIONES CIENTIFICAS, por John A. Swets, Robyn M. Dawes y John Monahan

Los recursos matemáticos al servicio de la toma de decisiones en la práctica médica y en la industria podrían depurar los diagnósticos.

INFORME ESPECIAL:

INTERNET EN SUS MANOS, por Fiona Harvey

Para estimular el crecimiento de la Web inalámbrica, las empresas desarrollan redes capaces de cursar ingentes volúmenes de datos y aparatos móviles que puedan explotar todos los recursos de Internet.

PROMESAS Y PELIGROS DEL WAP, por Karen J. Bannan

El Protocolo de Aplicaciones Inalámbricas (WAP) permite la conexión a Internet de los usuarios de telefonía celular, pero la técnica adolece de graves limitaciones.

EL FUTURO HA LLEGADO. ¿O TAL VEZ NO?, por David Wilson

¿Cómo podrán nunca popularizarse los teléfonos móviles de la Web con el tiempo y el dinero que cuesta enviar un correo electrónico?

EL SALTO DE LA TERCERA GENERACION, por Leander Kahney

Toda revolución exige un plan. ¿Qué técnica lo proporcionará?

